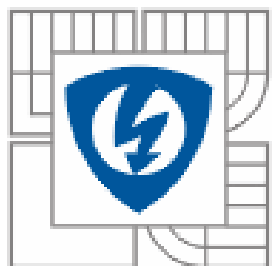


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

DIELEKTRICKÉ VLASTNOSTI EPOXIDOVÝCH LICÍCH PRYSKYŘIC PLNĚNÝCH MLETOU SLÍDOU

DIELECTRIC PROPERTIES OF EPOXY WITH GROUND MICA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Pavel Bednář

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Svatopluk Havlíček, CSc.

BRNO 2008

MÍSTO TOHOTO LISTU JE V PRÁCI VLOŽENO ZADÁNÍ

(b) **ZADÁNÍ.** ORIGINÁL ZADÁNÍ JE PŘEDÁN GARANTUJÍCÍM ÚSTAVEM, ZADÁNÍ DO DALŠÍCH PŘÍPADNÝCH KOPIÍ PRÁCE VZNIKÁ JAKO KOPIE ORIGINÁLU ZADÁNÍ.

Zadávací list práce (zadání), resp. jeho kopie, vyhotovená na jednom listu, se vkládá za titulní stranu práce. Je to druhý list práce, na kterém se číslo stránky neuvádí.

Licenční smlouva poskytovaná k výkonu práva užít školní dílo

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Pavel Bednář
Bytem: Olší 48, 592 61
Narozen/a (datum a místo): 15.10.1982, Nové Město na Moravě

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 244/53, 602 00 Brno
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1 Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):
- ☐ disertační práce
 - ☒ diplomová práce
 - ☐ bakalářská práce
 - ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Dielektrické vlastnosti epoxidových licích pryskyřic
plněných mletou slídou
Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Svatopluk Havlíček, CSc.
Ústav: Ústav elektrotechnologie
Datum obhajoby VŠKP: 10.6.2008

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- ☒ tištěné formě – počet exemplářů 2
- ☒ elektronické formě – počet exemplářů 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 30. 5. 2008

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt:

Práce pojednává o aplikaci metody dielektrické relaxační spektroskopie na vzorcích epoxidové licí hmoty plněných mletou slídou o zrnitosti 40 μm . Zkoumány jsou změny dielektrických vlastností v závislosti na plnění mletou slídou, na teplotě a relativní vlhkosti vzduchu, v kmitočtovém rozsahu 100 Hz až 1 MHz.

Abstract:

This thesis deals with the dielectric relaxation spectroscopy applied to samples of an epoxy slip filled by grounded mica with granularity of 40 μm . The changes of dielectric properties were investigated depending on the fulfillment of grounded mica, temperature, the relative air humidity, and the frequency between 100 Hz and 1MHz.

Klíčová slova:

Kompozity, epoxidová pryskyřice, slída, teplota, vlhkost, dielektrika, permitivita, ztrátový činitel.

Keywords:

Composites, epoxy, mica, temperature, humidity, dielectric, permittivity, dissipation factor.

Bibliografická citace díla:

BEDNÁŘ, P. *Dielektrické vlastnosti epoxidových licích pryskyřic plněných mletou slídou-diplomová práce*. Brno, 2008. 57 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Svatopluk Havlíček, CSc. FEKT VUT v Brně

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 30. 5. 2008

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Svatopluku Havlíčkovi, CSc. za cenné rady a připomínky, které mi poskytl během mé práce.

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektrotechnologie

POPISNÝ SOUBOR ZÁVEREČNÉ PRÁCE

Autor:	Bc. Pavel Bednář
Název závěrečné práce:	Dielektrické vlastnosti epoxidových licích pryskyřic plněných mletou slídou
Název závěrečné práce ENG:	Dielectric properties of epoxy with ground mica
Anotace závěrečné práce:	Práce pojednává o aplikaci metody dielektrické relaxační spektroskopie na vzorcích epoxidové licí hmoty plněných mletou slídou o zrnitosti 40 μm . Zkoumány jsou změny dielektrických vlastností v závislosti na plnění mletou slídou, na teplotě a relativní vlhkosti vzduchu, v kmitočtovém rozsahu 100 Hz až 1 MHz.
Anotace závěrečné práce ENG:	This thesis deals with the dielectric relaxation spectroscopy applied to samples of an epoxy slip filled by grounded mica with granularity of 40 μm . The changes of dielectric properties were investigated depending on the fulfillment of grounded mica, temperature, the relative air humidity, and the frequency between 100 Hz and 1MHz.
Klíčová slova:	Kompozity, epoxidová pryskyřice, slída, teplota, vlhkost, dielektrika, permitivita, ztrátový činitel
Klíčová slova ENG:	Composites, epoxy, mica, temperature, humidity, dielectric, permittivity, dissipation factor
Typ závěrečné práce:	diplomová
Datový formát elektronické verze:	formát pdf
Jazyk závěrečné práce:	český
Přidělovaný titul:	Ing.
Vedoucí závěrečné práce:	Ing. Svatopluk Havlíček, CSc..
Škola:	Vysoké učení technické v Brně

Fakulta:	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav:	Ústav elektrotechniky
Studijní program:	Elektrotechnika, elektronika, komunikační a řídicí technika
Studijní obor:	Elektrotechnická výroba a management

1	Úvod do problematiky	11
2	Teoretický rozbor	12
2.1	Dielektrické vlastnosti látek	12
2.1.1	Dielektrika a izolanty.....	12
2.1.2	Polarizace a vzájemné působení elektrického pole a látek.....	13
2.1.3	Mechanismy polarizací.....	15
2.1.4	Dielektrické ztráty a komplexní permitivita.....	18
2.2	Vliv vlhkosti na dielektrika	19
2.2.1	Vlhkost vzduchu	19
2.3	Vliv vlhkosti na dielektrické vlastnosti materiálů	21
2.4	Stabilizace vlhkosti a teploty	24
2.5	Kompozitní materiály	25
2.5.1	Rozdělení kompozitních materiálů.....	26
2.5.2	Permitivita kompozitů	29
2.5.3	Kompozity v silovém poli	30
2.6	Slída v elektrotechnice.....	31
2.7	Epoxidové pryskyřice	31
3	Experimentální část	33
3.1	Zkušební vzorky	33
3.2	Výroba zkušebních vzorků	33
3.3	Měřicí zařízení.....	34
3.4	Měřicí pracoviště	38
3.5	Zhodnocení výsledků měření.....	41
4	Závěr	57
5	Seznam použité literatury	58

Seznam použitých symbolů

C_0	[F]	kapacita s vakuovým dielektrikem
C_x	[F]	kapacita s dielektrikem
d	[m]	průměr měřicí elektrody
D	[C.m ⁻²]	elektrická indukce
E	[V.m ⁻¹]	intenzita elektrického pole
E_p	[V.m ⁻¹]	elektrická pevnost
f	[Hz]	kmitočet
g	[m]	mezera mezi měřicí a ochranou elektrodou
G_0	[S]	vodivost
h	[m]	tloušťka vzorku
I	[A]	elektrický proud
j	[-]	imaginární jednotka
L	[H]	indukčnost
m	[kg]	hmotnost
P	[C.m ⁻²]	vektor polarizace
Q	[C]	elektrický náboj
R	[Ω]	elektrický odpor
S	[m ²]	plocha elektrod
S_{ef}	[m ²]	efektivní plocha
t	[s]	čas
$tg\delta$	[-]	ztrátový činitel
U	[V]	elektrické napětí
V	[m ⁻³]	objem
Φ	[kg.m ⁻³]	absolutní hmotnost
φ	[%]	relativní vlhkost
δ	[rad]	ztrátový úhel

ε^*	[-]	komplexní permitivita
ε'	[-]	reálná složka komplexní permitivity
ε''	[-]	imaginární složka komplexní permitivity
ε_0	[F.m ⁻¹]	permitivita vakua (8,854.10 ⁻¹²)
ε_r	[-]	relativní permitivita
κ	[-]	dielektrická susceptibilita
ρ	[Ω.m]	měrný odpor
ψ	[%]	vlhkost materiálu
ω	[rad.s ⁻¹]	kruhový kmitočet

1 Úvod do problematiky

V elektrotechnice je snaha vytvořit materiál, s co možná nejlepšími vlastnostmi. Jednou z možností jak dosáhnout lepších mechanických, tepelných, tvarových a dielektrických vlastností je kombinace různých materiálů. Takové materiály jsou nazývány kompozity.

Předmětem zkoumání dielektrických vlastností byla zvolena jako matrice epoxidová licí hmota dodána podnikem ABB Brno. Epoxidová licí hmota obecně vykazuje dobré vlastnosti, jako jsou nízká navlhavost, malá smrštitelnost při vytvrzování a dobrá přilnavost k materiálům. Plnivem byla zvolena jemně mletá slída o zrnitosti 40 μm . Slída vyniká svými izolačními a teplovzdornými vlastnostmi.

Úkolem předložené diplomové práce je zjistit, jaké dielektrické vlastnosti bude mít epoxidová licí hmota v závislosti na hmotnostním plnění slídou, na teplotě a na relativní vlhkosti vzduchu. Vytvořené vzorky budou pozorovány v kmitočtovém spektru 100 Hz až 1 MHz. K zjištění dielektrických vlastností bude použita metoda dielektrické relaxační spektroskopie (DRS), která se zabývá získáváním poznatků o jednotlivých relaxačních a vodivostních procesech v kmitočtové a časové závislosti.

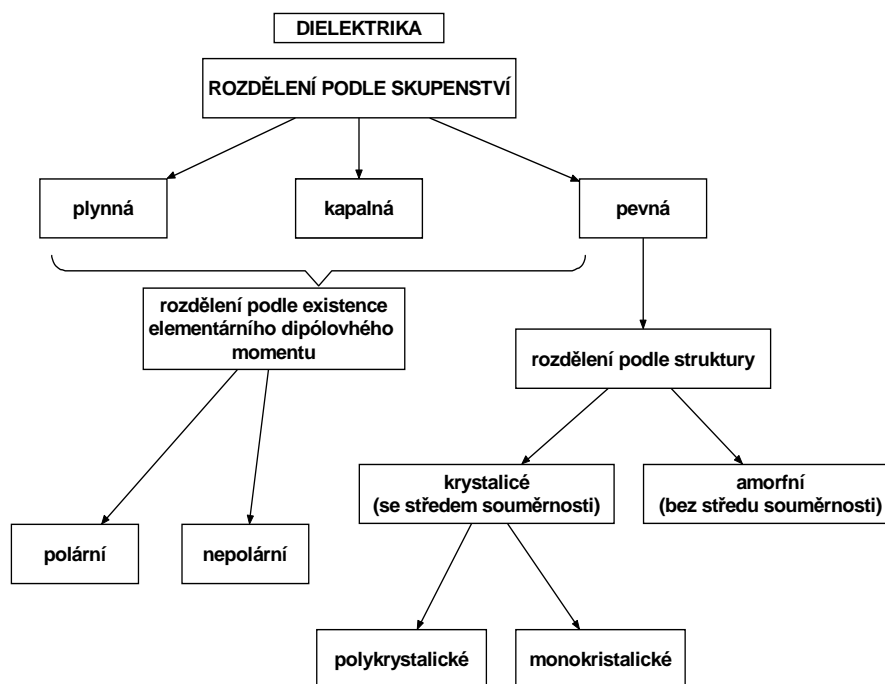
2 Teoretický rozbor

2.1 Dielektrické vlastnosti látek

2.1.1 Dielektrika a izolanty

Elektrický izolant je látka s velkou elektrickou pevností a s malou elektrickou vodivostí. Úloha izolantu je oddělení vodivých těles s různým elektrickým potenciálem. Vlastností dielektrik je schopnost se polarizovat v elektrickém poli a hromadit elektrickou energii. Každý izolant je současně dielektrikem, ale ne každé dielektrikum je izolant. Dielektrikum se navenek sice jeví jako elektricky neutrální, ale v elektrickém poli dochází k polarizaci, tj. k vzájemnému posunutí kladných nábojů ve směru elektrického pole a záporných nábojů směrem opačným.

Dielektrika a izolanty se dělí zpravidla třemi způsoby. Základním a prvním dělením je informace o jejich struktuře, například poznatky o vazbách jimiž vznikly a jsou tvořeny a které mají pro charakter látky zásadní význam. Druhé dělení je podle skupenství látky. Třetí dělení je podle vlastnosti nosičů elektrických nábojů, které jsou v materiálu přítomny. Základní rozdělení dielektrik je znázorněno na Obr. 2.1.



Obr. 2.1 Základní rozdělení dielektrik

Nosičem náboje jsou ionty a elektrony. Rozhodující je míra volnosti jejich pohybu. Podle velikosti vazebních sil ve struktuře látky se rozlišují nosiče elektrického náboje volné a vázané. Volné nosiče se mohou pohybovat materiálem, proto se materiály s jejich vysokou

koncentrací vyznačují vysokou elektrickou vodivostí. Jedná se o volné ionty vznikající disociací molekul nečistot, někdy disociací molekul vlastní látky, významně ovlivňující elektrickou vodivost látek. Vázané nosiče náboje jsou naopak pevně drženy v blízkosti svých rovnovážných poloh a na působení elektrického pole reagují jen určitým větším či menším posuvem (změnou polohy), nikoliv však pohybem na větší vzdálenosti, což je vzdálenost odpovídající několikanásobku mřížkové konstanty. Chování látek, po jejich vložení do vnějšího elektrického pole, závisí na koncentraci a druhu nosičů elektrického náboje, které jsou v nich přítomny.

2.1.2 Polarizace a vzájemné působení elektrického pole a látek

Vzájemné působení elektrického pole a látek začíná v okamžiku, kdy je látka vložena do elektrického pole. V případě dielektrika začínají probíhat v látce děje, které se nazývají polarizačními procesy. Protože jsou dielektrika látkami schopnými v této situaci tvorby vlastního vnitřního elektrického pole, jsou tyto polarizační děje závislé na stavbě a struktuře dané látky. Při vložení dielektrika do elektrického pole se sleduje průběh polarizačních jevů. Toto sledování se provádí dvěma způsoby.

První způsob sledování je z makroskopického hlediska, kdy se chápe dielektrikum jako objekt o určitém rozměru a sledují se vnější projevy polarizačních dějů. Výsledkem polarizace je vznik vázaných nábojů na povrchu dielektrika a s tím související vznik dipólového momentu.

Ve druhém případě se sleduje polarizace dielektrika z mikroskopického hlediska. Na základě znalostí jeho struktury se hledá fyzikální podstata polarizačních jevů probíhajících uvnitř dielektrika a hledá se tak příčina odezev pozorovatelných z makroskopického pohledu. Polarizace je zde chápána jako pružné posunutí nosičů vázaného náboje ve směru odpovídajícího přiloženého elektrického pole a natočení dipólových momentů existujících ve struktuře látek.

Pohled na polarizaci dielektrik z makroskopického hlediska

V tomto případě se sleduje výsledek polarizace celku dielektrického materiálu a vznik elektrického náboje na jeho povrchu. Na povrchu dielektrika vloženého do elektrického pole se objeví elektrický vázaný náboj, to znamená, že dielektrikum jako celek získá dipólový moment. Polarizované dielektrikum je charakterizováno vektorem polarizace \vec{P} a je definováno objemovou hustotou dipólového momentu [5]

$$\vec{P} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{M}}{\Delta V}, \quad (1)$$

kde $\Delta \vec{M}$ vyjadřuje dipólový moment objemového elementu ΔV .

Mezi intenzitou elektrického pole působícího na dielektrikum a vektorem polarizace platí výraz [5]

$$\vec{P} = \kappa \cdot \varepsilon_0 \cdot \vec{E}, \quad (2)$$

ve kterém dielektrická susceptibilita κ určuje míru polarizace dielektrika vloženého do vnějšího elektrického pole a ε_0 je permitivita vakua jehož hodnota je $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$. Elektrická indukce je dána výrazem [5]

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P}, \quad (3)$$

nebo

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E}, \quad (4)$$

kde permitivita ε charakterizující dielektrikum je rovna výrazu [5]

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r, \quad (5)$$

kde ε_r je relativní permitivita vloženého dielektrika mezi elektrody a je rovna [5]

$$\varepsilon_r = \frac{C_x}{C_0}, \quad (6)$$

kde C_x je kapacita kondenzátoru s dielektrikem a C_0 je kapacita kondenzátoru, jehož dielektrikum je vakuum.

Pokud je vloženo dielektrikum mezi dvě elektrody s napětím U , přiteče na tyto elektrody volný elektrický náboj $\pm Q$, jehož velikost je dána [5]

$$Q = C \cdot U. \quad (7)$$

Mezi elektrodami se vytvoří elektrické pole E o intenzitě dané poměrem napětí na kondenzátoru U a vzdáleností jeho elektrod d [5]

$$E = \frac{U}{d}. \quad (8)$$

Kapacita deskového kondenzátoru s vloženým dielektrikem je pak dána výrazem [5]

$$C_0 = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d}, \quad (9)$$

ve kterém S je plocha elektrod a d je vzdálenost mezi nimi.

Pohled na polarizaci dielektrik z mikroskopického hlediska

V tomto případě je pozorováno chování dielektrik na úrovni jeho struktury a chování nosičů náboje, které jsou vázány se základními stavebními prvky. Podle této struktury závisí možnost a rychlost pohybu nosičů elektrického náboje také na vzdálenosti, ve které se nosiče mohou pohybovat. Projevem polarizace z mikroskopického hlediska je orientace dipólových momentů podle směru elektrického pole, nebo vznik nových dipólových momentů. Dipólový moment je vektorová veličina popisující nesymetrické rozdělení elektrického náboje, např. v molekule, nebo v malé skupině atomů.

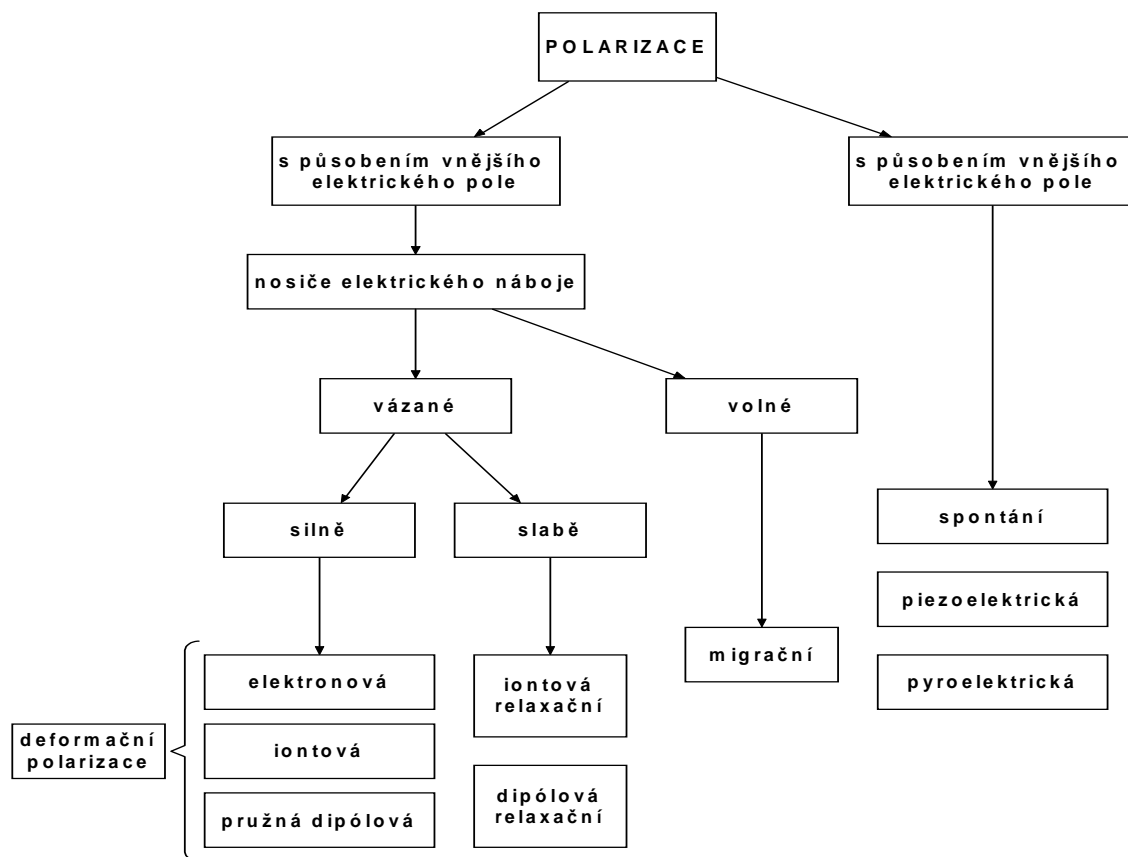
Vznik nových (tzv. indukovaných) dipólových momentů v dielektriku je výsledkem posunutí vyvolaného nejčastěji vnějším elektrickým polem nosičů kladného a záporného elektrického náboje. Původně splývající těžiště kladného a záporného elektrického náboje zaujme nové rovnovážné polohy v určité vzájemné vzdálenosti. Po skončení působení elektrického pole, které toto posunutí vyvolalo, indukované dipólové momenty zanikají a nosiče elektrického náboje se vrací na svá původní místa.

Některé materiály dipólové momenty mají dány chemickými vazbami. Přítomnost těchto dipólových momentů není podmíněna působením vnějšího elektrického pole. Pokud je na tento materiál přiloženo elektrické pole, pak se momenty natáčí souhlasně a částečně mění i svou velikost podle působení vnějšího elektrického pole. Tomuto jevu se zjednodušeně říká natáčení dipólů.

Veličina charakterizující polarizační jevy se nazývá polarizovatelnost a značí se α . Polarizovatelnost udává změny dielektrika ve vnějším poli při polarizování, tedy deformabilitu (míru elektrizování).

2.1.3 Mechanismy polarizací

O tom, jak bude polarizace probíhat rozhoduje struktura daného dielektrika. Celkový průběh polarizace je superpozicí působení jednotlivých polarizací. Mechanismů polarizace dielektrik existuje více druhů, rozdělit je lze podle schématu na Obr. 2.2. První základní rozdělení polarizačních mechanismů je podle toho, je-li ke zpolarizování dielektrika třeba přítomnost vnějšího elektrického pole. V některých případech může být dielektrikum zpolarizováno i v prostředí bez působení vnějšího elektrického pole. V těchto zvláštních případech dochází ke zpolarizování jinými vlivy než elektrickým namáháním (např. mechanickým namáháním u piezoelektrik). Může jít i o případy, kdy je dielektrikum schopné udržet si stav zpolarizování delší dobu i po odeznění vlivu, který polarizaci vyvolal (elektrety).



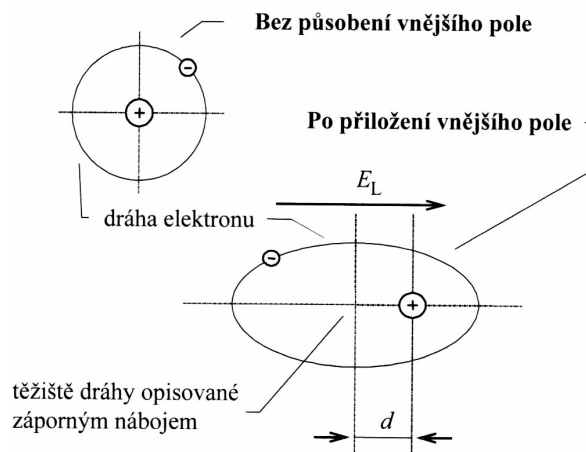
Obr. 2.2 Rozdělení polarizačních mechanismů

Pružné polarizace

Pružné polarizace probíhají okamžitě s krátkou dobou trvání a bez ztrát energie. Tyto polarizace jsou tepelně a kmitočtově (v celém rozsahu používaných v elektrotechnice) nezávislé. Do této skupiny polarizací patří elektronová a iontová pružná polarizace.

Elektronová polarizace

K této polarizaci dochází vždy a vyskytuje se u všech látek a ve všech skupenstvích a není spojena se ztrátou energie. Nepůsobí-li na atom vnější elektrické pole, jsou těžiště kladného a záporného náboje v jednom bodě. Pokud na atom bude působit elektrické pole, dojde k vychýlení elektronu vůči kladnému náboji a tím získá atom indukovaný dipólový moment. Toto vychýlení je dáno velikostí elektrického pole a silou, kterou jsou elektrony vázány k jádru. Tento jev je znázorněn na Obr. 2.3.



Obr. 2.3 Schéma elektronové polarizace

Iontová bezeztrátová polarizace

Hlavní roli v této polarizaci hrají ionty, které jsou stavebními prvky iontových krystalů, vázaných iontovými vazbami. Na rozdíl od elektronové polarizace zde již existují dipólové momenty i bez přítomnosti vnějšího elektrického pole. Při působení vnějšího elektrického pole dochází k posunutí iontů. Doba ustálení je v rozmezí 10^{-13} až 10^{-12} s. Iontová polarizace je frekvenčně nezávislá a je bezeztrátová.

Relaxační polarizace

Polární částice, které jsou slaběji vázané se sousedními částicemi, konají kmitavé pohyby a vlivem tepla se chaoticky přemísťují. Tento pohyb je přibližně na vzdálenost rozměrů molekul. Jakmile začne na tyto chaotické pohyby působit vnější elektrické pole, dojde k jeho částečnému usměrnění. Nositelé náboje se natočí podle směru působení elektrického pole. Tím vznikne nesymetrické rozložení náboje v dielektriku a důsledkem toho vzroste dipólový moment. Název relaxační vychází z toho, že působením elektrického pole polarizace přibývá pomalu se zpožděním. Se zánikem elektrického pole polarizace pomalu ubývá. Doba ustálení těchto jevů je poměrně dlouhá a nazývá se relaxační dobou. Tyto polarizace jsou závislé na teplotě. Patří sem relaxační polarizace iontová a relaxační polarizace dipólová.

Iontová relaxační polarizace

Tato polarizace probíhá v látkách složených z iontů nebo obsahujících takové skupiny molekul či atomů (např. volné ionty příměsí a nečistot), které jsou slabě vázány k sousedním stavebním částicím látky. Jsou velice citlivé na vnější elektrické pole. Bývají to například amorfnní látky jako anorganická skla, keramické látky s obsahem skloviny, nebo anorganické krystalické látky s iontovou vazbou. Společnou vlastností všech těchto látek je netěsnost vazeb, které váží jednotlivé částice.

Dipólová relaxační polarizace

Dipólová relaxační polarizace se také nazývá tepelná orientační polarizace a vyskytuje se v polárních látkách, které mají dipólové molekuly vázány tak slabě, že se vlivem elektrického pole mohou snadno natáčet podle směru působícího elektrického pole. Natáčení je velice závislé na teplotě a podílí se na ztrátách. Doba ustálení dipólové polarizace je 10^{-8} až 10^{-12} s.

2.1.4 Dielektrické ztráty a komplexní permitivita

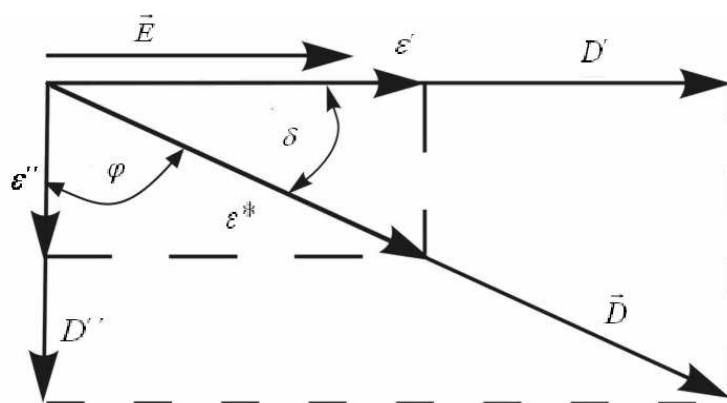
Při použití dielektrik je důležité vědět, kolik elektrické energie se díky dějům odehrávajícím se v jeho struktuře po jeho zatížení elektrickým polem změní v jeho objemu za jednotku času v jinou, většinou, z hlediska elektroizolační techniky nežádoucí, tepelnou energii. Tato změna energie se nazývá dielektrické ztráty. Mechanismus dielektrických ztrát záleží na mnoha faktorech a v jednotlivých dielektrikách se liší v závislosti na jeho druhu, struktuře, chemickém složení, obsahu nečistot a příměsí, na vnitřní stavbě a na vnějších fyzikálních podmínkách. Příčinou dielektrických ztrát jsou i pohyby volných a vázaných nosičů elektrického náboje obsaženého v materiálu. Dielektrické ztráty mohou vznikat i vlivem částečných výbojů ve vzduchových komůrkách dielektrika. Ztráty také vznikají vlivem relaxačních polarizací (iontovou nebo dipólovou relaxační polarizací) tím, že vnější elektrické pole částečně překonává a usměrňuje chaotický tepelný pohyb částic. To je příčinou opožďování pohybů vázaných nosičů elektrického náboje za změnami vnějšího elektrického pole. Dielektrické ztráty vznikají při stejnosměrném i střídavém napětí. V případě stejnosměrného napětí je rozhodující vodivostní proud jehož průchodem dielektrikem vznikají Jouleovy ztráty.

Pokud na dielektrikum působí střídavé elektrické pole, s časovým průběhem intenzity [5]

$$E(t) = \vec{E} \cos \omega t, \quad (10)$$

kde \vec{E} je amplituda intenzity elektrického pole, t je čas a $\omega = 2\pi f$ je kruhový kmitočet.

Uplatní se kromě vodivostních ztrát i ztráty vyvolané polarizacemi a ionizační ztráty. Ztráty ve střídavém elektrickém poli bývají mnohem větší než v poli stejnosměrném. Při zkoumání dielektrických ztrát ve střídavém elektrickém poli vystupuje do popředí veličina ztrátový úhel δ . Tento úhel vyjadřuje zpoždění časového průběhu elektrické indukce $D(t)$ za průběhem intenzity elektrického pole $E(t)$. Proto $D(t)$ není ve fázi s $E(t)$, ale je mezi amplitudami \vec{D} a \vec{E} zpožděn o fázový úhel δ . V praxi se ztráty daného dielektrika nejčastěji vyjadřují právě na základě velikosti tangenty ztrátového úhlu a mluví se pak o ztrátovém činiteli $\tan \delta$.



Obr. 2.4 Vektorový diagram elektrické indukce, intenzity elektrického pole a komplexní permitivity

Komplexní permitivita ε^* je kmitočtově závislá veličina skládající se ze dvou složek. Ze složky reálné ε' , která je mírou kapacitního charakteru dielektrika (odpovídá relativní permitivitě ε_r) a ze složky imaginární ε'' , která je úměrná celkovým ztrátám (polarizačním, vodivostním) v dielektriku a nazývá se také ztrátové číslo. Komplexní permitivita je dána výrazem [5]

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega). \quad (11)$$

Hodnoty ε' a ε'' jsou patrné z Obr. 2.4 a jsou rovny [5]

$$\varepsilon' = \varepsilon^* \cos \delta \quad (12)$$

$$\varepsilon'' = \varepsilon^* \sin \delta. \quad (13)$$

Z nich se pak vypočítá ztrátový činitel [5]

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}. \quad (14)$$

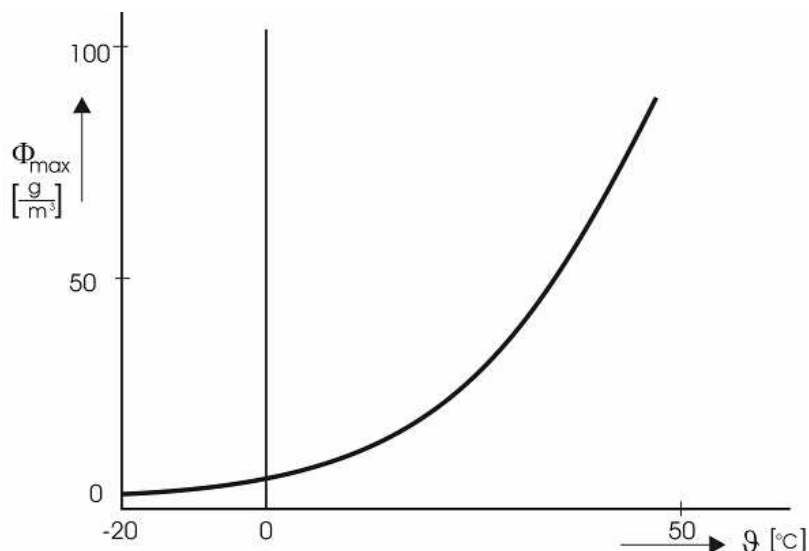
2.2 Vliv vlhkosti na dielektrika

2.2.1 Vlhkost vzduchu

Vlhkost je jednou ze základních vlastností vzduchu, která udává množství vody, v podobě vodní páry, v suchém vzduchu. Je-li materiál ve vlhkém prostředí, dochází k adsorbování vody na povrch nebo k pronikání do materiálu. Tomuto ději se říká navlhavost. Látky jsou schopny vodu vázat nebo odpuzovat. Tato vlastnost je závislá na povaze a struktuře látek. Pokud se látky vodou nesmáčejí a vodu odpuzují, jsou nazývány hydrofobními. Pokud látky vodu přitahují a jsou smáčeny, nazývají se hydrofilní. Jsou-li posuzovány vlastnosti dielektrik, tak má rozhodující význam jejich chování v závislosti na okolní vlhkosti. Vniklá voda v dielektriku snižuje vnitřní a povrchový odpor, zvětšuje se ztrátový činitel, klesá elektrická pevnost a vzrůstá permitivita.

Množství vodních par ve vzduchu vyjadřují hodnoty absolutní a relativní vlhkost.

Absolutní vlhkost Φ vyjadřuje hmotnost vodní páry m , která je obsažena v objemové jednotce. Obvykle je v praxi udávána v jednotkách $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Hodnota Φ je velmi závislá na teplotě. Závislost je patrna z Obr. 2.5. Za určité teploty je vzduch maximálně nasycen vodními parami a tento stav je nazýván maximální hodnotou absolutní vlhkosti Φ_{\max} . Větší množství vlhkosti než Φ_{\max} vzduch nemůže obsahovat. Přebytečná vlhkost se sráží ve formě rosy nebo jinovatky.



Obr. 2.5 Teplotní závislost Φ_{\max} vzduchu nasyceného vodními parami

Absolutní vlhkost vzduchu se počítá podle výrazu [2]

$$\Phi = \frac{m}{V}, \quad (15)$$

kde m je hmotnost vodní páry v objemu vzduch V .

Relativní vlhkost vzduchu φ [%] je definována jako poměr absolutní vlhkosti vzduchu k absolutní vlhkosti vzduchu s nasycenými vodními párami při stejné teplotě a tlaku a je dána výrazem [2]

$$\varphi = \frac{\Phi}{\Phi_{\max}} \cdot 100. \quad (16)$$

Rozdělení relativní vlhkosti vzduchu je podle tabulky Tab. 2.1

Tab. 2.1 Označení vlhkosti vzduchu

Označení vlhkosti vzduchu	Relativní vlhkost vzduchu
Suchý vzduch	pod 50%
Normální vlhký	70 - 85%
Vlhký vzduch	90% a více

Pro měření a zkoušení vlastností materiálů se doporučuje prostředí B o teplotě $23 \pm 2^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti $50 \pm 5\%$.

Teplota rosného bodu je teplota při které je vzduch maximálně nasycen vodními parami (relativní vlhkost vzduchu dosáhne 100%). Pokud teplota klesne pod tento bod, nastává kondenzace, což je skupenská přeměna, při které se plyn mění na kapalinu. Teplota rosného bodu je různá pro různé absolutní vlhkosti vzduchu. Čím více je vodní páry ve vzduchu, tím vyšší je teplota rosného bodu.

Teplota mezního adiabatického ochlazení je taková teplota vodní lázně, při které se všechno teplo, potřebné pro odpařování vody do vzduchu v tepelně izolované soustavě, odebírá ze vzduchu. Teplota vody se při tomto procesu nemění.

Voda v pevné látce může být přítomna jako:

voda krystalická

voda osmotická

voda adsorbovaná

voda kapilární

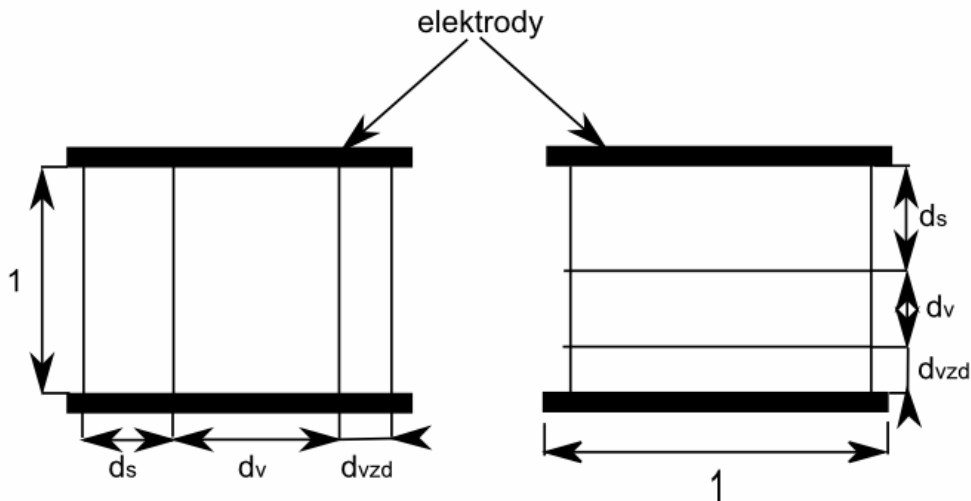
voda rozpuštěná

voda volná

2.3 Vliv vlhkosti na dielektrické vlastnosti materiálů

Vliv vlhkosti na permitivitu

V suchém stavu mají izolační materiály relativní permitivitu ϵ_r přibližně 2 až 8 a činitel dielektrických ztrát $\tan \delta$ menší než 10^{-1} . Permitivita vody je však 81. Aby se vystihla závislost ϵ_r na obsahu vody, lze vycházet ze schematického modelu vlhkého dielektrika, znázorněného na Obr. 2.6. Voda a vzduch se zde vyskytují samostatně a navzájem se neovlivňují. To je ovšem hrubá představa, neboť ve skutečnosti, alespoň v místech vazby vody s materiálem, má materiál jiné dielektrické vlastnosti než materiál suchý. Mimo to vlastnosti vody mění vlastnosti látek, které jsou v materiálu rozpuštěné.



Obr. 2.6 Schematický model vlhkého dielektrika

Rozložení vlhkosti v dielektriku se může do značné míry lišit. Jsou brány v úvahu dva limitní případy. V prvním případě mohou být jednotlivé složky uspořádány paralelně a ve druhém případě sériově. Budeme uvažovat dielektrikum o tvaru krychle o jednotkových délkách. Tloušťku jednotlivých vrstev označme d_s , d_v , a d_{vzd} . Index s se vztahuje k suché části, index v k vodě a index vzd ke vzduchu. Pak platí výraz [1]

$$d_s + d_v + d_{vzd} = 1. \quad (17)$$

Pro paralelní uspořádání složek je celková permitivita ϵ měřená mezi elektrodami [1]

$$\epsilon = d_s \epsilon_s + d_v \epsilon_v + d_{vzd} \epsilon_{vzd} \quad (18)$$

a pro sériové uspořádání složek [1]

$$\frac{1}{\epsilon} = \frac{d_s}{\epsilon_s} + \frac{d_v}{\epsilon_v} + \frac{d_{vzd}}{\epsilon_{vzd}}. \quad (19)$$

Ve skutečnosti jsou jednotlivé složky uspořádány v materiálu nepravidelně, platí tedy pro celkovou permitivitu výraz [1]

$$\epsilon^k = d_s \epsilon_s^k + d_v \epsilon_v^k + d_{vzd} \epsilon_{vzd}^k, \quad (20)$$

kde k leží podle způsobu uspořádání složek mezi extrémními hodnotami $k = 1$ a $k = -1$.

$k \rightarrow 1$ paralelně uložené částice

$k \rightarrow -1$ sériově uložené částice

Obsah vlhkosti vyjádřený hmotou sorbované vody a suchého materiálu je [1]

$$\psi = \frac{m_v}{m_v + m_s}, \quad (21)$$

kde m_s je hmotnost vody a m_v je hmotnost suché substance

Vliv vlhkosti na elektrický odpor

Aby se učinila základní představa o charakteru závislosti elektrického odporu na obsahu vody, vyjdeme opět ze schematického modelu vlhkého izolantu na Obr. 2.6. Lze si opět představit, že “suchá substance“, voda a vzduch se ve vlhkém materiálu vyskytují samostatně a navzájem se neovlivňují. Opět uvažujme, že máme izolant tvaru krychle s jednotkovým objemem. Tloušťku vrstev jednotlivých složek označme d_s , d_v , d_{vzd} , kde index s se vztahuje k suché substanci, index v k vodě a index vzd ke vzduchu. Platí tedy [1]

$$d_s + d_v + d_{vzd} = 1. \quad (22)$$

Pro paralelní uspořádání složek je mezi elektrodami celkový odpor R [1]

$$\frac{1}{R} = \frac{d_s}{\rho_s} + \frac{d_v}{\rho_v} + \frac{d_{vzd}}{\rho_{vzd}} \quad (23)$$

kde ρ_s , ρ_v , ρ_{vzd} jsou měrné odpory jednotlivých složek.

Pro sériové uspořádání složek je mezi elektrodami celkový odpor R [1]

$$R = d_s \rho_s + d_v \rho_v + d_{vzd} \rho_{vzd}. \quad (24)$$

Ve skutečnosti jsou jednotlivé složky uspořádány v materiálu nepravidelně, potom platí pro celkový elektrický odpor obecnější výraz [1]

$$R^k = d_s \rho_s^k + d_v \rho_v^k + d_{vzd} \rho_{vzd}^k, \quad (25)$$

přičemž k leží podle způsobu uspořádání složek mezi extrémními hodnotami

$$k = 1 \text{ a } k = -1$$

$$k \rightarrow -1 \quad \text{paralelně uložené částice}$$

$$k \rightarrow 1 \quad \text{sériově uložené částice}$$

Vliv vlhkosti na ztrátový činitel

Řešení je opět podle modelu vlhkého dielektrika znázorněného na Obr. 2.6. Pro ztrátový činitel tohoto dielektrika platí výraz [1]

$$\text{tg } \delta = \frac{d_s \epsilon_s^k \text{tg } \delta_s + d_v \epsilon_v^k \text{tg } \delta_v + d_{vzd} \epsilon_{vzd}^k \text{tg } \delta_{vzd}}{d_s \epsilon_s^k + d_v \epsilon_v^k + d_{vzd} \epsilon_{vzd}^k}, \quad (26)$$

kde pro k platí

$$k \rightarrow 1 \quad \text{paralelně uložené částice}$$

$$k \rightarrow -1 \quad \text{sériově uložené částice}$$

Ztrátový činitel vzduchu je prakticky roven nule a permitivita vzduchu je rovna jedné. Po úpravě se získá výraz [1]

$$tg \delta = \frac{tg \delta_s}{1 + \frac{d_v}{d_s} \left(\frac{\epsilon_v}{\epsilon_s} \right)^k + \frac{d_{vzd}}{d_s} \frac{1}{\epsilon_s k}} + \frac{tg \delta_v}{1 + \frac{d_s}{d_v} \left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon_v} \right)^k + \frac{d_{vzd}}{d_v} \frac{1}{\epsilon_v k}}. \quad (27)$$

2.4 Stabilizace vlhkosti a teploty

Vyhřívání komora

Vyhřívání komora je zařízení sloužící k simulování různých tepelných klimatických podmínek a umožňuje pozorování jejich vlivu na dielektrické vlastnosti zkoumaného materiálu. V komoře mohou být různé zdroje tepla. V tomto měření byla použita elektricky vyhřívání topná tělesa. K vytvoření homogenních podmínek v komoře lze využít zařízení vytvářející nucený oběh vzduchu (větrák). Komory bývají opatřené průchodkami, sloužícími k propojení měřicího zařízení s měřicím přístrojem. Při tomto uspořádání lze sledovat vlastnosti vzorku, aniž by byl ovlivňován vnějšími podmínkami laboratoře.

Hygrostaty

Jsou zařízení, ve kterých je udržována stálá relativní vlhkost vzduchu při stálé teplotě. Toto zařízení umožňuje pozorování vlivu zvýšené vlhkosti vzduchu na materiály. V laboratořích lze hygrostat vytvořit z exsikátoru, ve kterém se dolní část zaplní vodou, nebo roztoky chemických látek. Jednoduché vytvoření hygrostatu s regulací teploty, lze vytvořit vložením exsikátoru do termostatické komory zajišťující stabilizaci teploty. Při tomto uspořádání lze pozorovat chování materiálů ve vlhkém prostředí, i při změnách teploty. Některé hygrostaty bývají opatřené průchodkami, sloužícími k propojení měřicího zařízení s měřicím přístrojem.

Použitím modernějších hygrostatů (klimatizačních komor), lze simulovat extrémní podmínky tropických oblastí, s relativní vlhkostí 95 až 98 %. Zdrojem tepla bývá nejčastěji elektrická topná tělesa. V takových komorách se nastaví požadovaná hodnota relativní vlhkosti a teploty. Přístroj dokáže těchto hodnot dosáhnout takovým průběhem, aby nedocházelo ke kondenzaci vlhkého vzduchu.

Udržování vlhkosti roztoky solí

Relativní vlhkost v uzavřeném prostředí se může stabilizovat pomocí nasycených roztoků s přebytkem pevné fáze. U nasycených roztoků se případné změny v koncentraci roztoku vyrovnávají tak, že část rozpuštěné soli přejde v pevnou fázi, nebo naopak část krystalů soli se rozpustí. Při vytváření konstantní relativní vlhkosti pomocí roztoků, se musí zajistit, aby fáze kapalná a plynná, byly v termodynamické rovnováze. To vyžaduje stejnou teplotu obou fází a

také rovnovážnou teplotu tlaku vodní páry. Toho se docílí vložením nádoby do termostatu, udržujícího stejnou teplotu v celé nádobě.

Snižování vlhkosti vzduchu

Pro snižování vodního obsahu vzduchu (vysoušení), je možno použít tuhých, nebo kapalných hygroskopických látek. Tyto látky pohlcují vlhkost ze vzduchu až do stavu své hygroskopické rovnováhy. U tuhých hygroskopických látek je schopnost pohlcování umožněna především velkým vnitřním povrchem látky. Pohlcování vodní páry se děje mechanismem adsorpce a kapilární kondenzace. Při tomto procesu se uvolňuje teplo, které zvyšuje teplotu vysoušeného vzduchu. Množství vody, které může být ze vzduchu hygroskopickou látkou pohlceno, závisí na teplotě látky, relativní vlhkosti vzduchu a teplotě vzduchu.

V praxi se jako tuhé hygroskopické látky pro vysušování vzduchu využívá silikagel, molekulové síto a aktivovaný oxid hlinitý.

2.5 Kompozitní materiály

Jako kompozitní materiál je označována soustava, která je vytvořena člověkem, takže ke kompozitním materiálům nepatří přírodní materiály. Kompozit je tvořen ze dvou a více materiálů, které mají rozdílné chemické složení. Tato soustava musí mít makroskopicky rozeznatelné rozhraní mezi fázemi a dosahuje vlastností, které nemohou být dosaženy kteroukoliv samostatnou složkou.

Jedna fáze v kompozitu je spojitá a nazývá se matrice. Nespojité fáze se nazývají plnivo. V porovnání s matricí má plnivo obvykle výrazně vyšší mechanické vlastnosti, například modul pružnosti, pevnost, tvrdost.

V elektrotechnice se kompozitních materiálů využívá k tvorbě elektroizolačních prvků, protože takto modifikované materiály mívají dielektrické a mechanické vlastnosti lepší než základní materiál.

Tyto vlastnosti jsou závislé na vlastnostech částic, jejich množství, tvaru, uspořádání a také na jejich orientaci v soustavě. Velký vliv na vlastnosti kompozitů mají chemické či fyzikální pochody na rozhraní jejich složek, k nimž může docházet buď při výrobě, nebo při jejich používání.

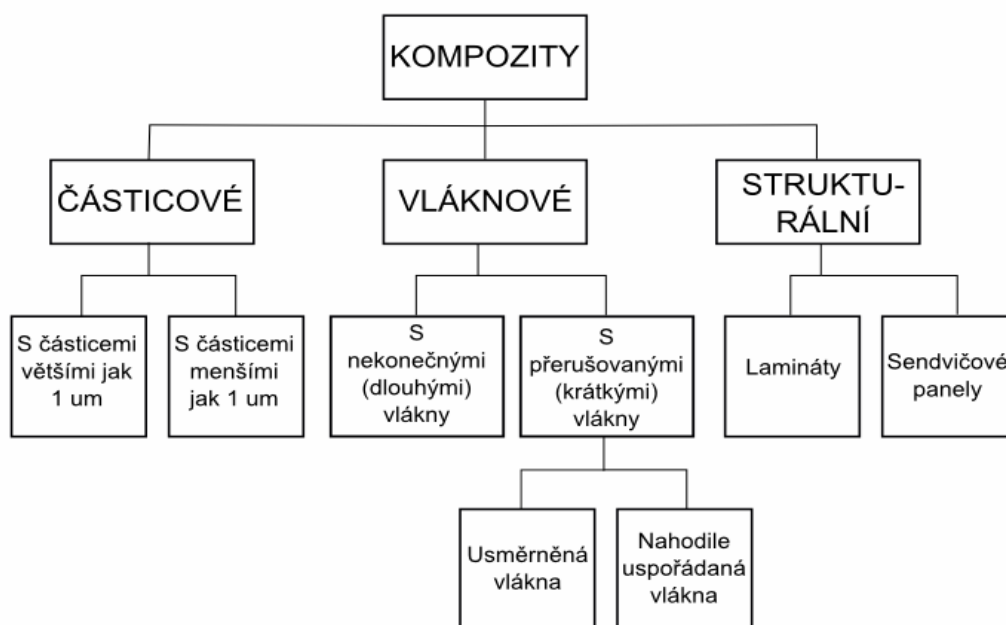
Použitím kompozitních materiálů je snaha zlepšit zejména:

Mechanické vlastnosti (zvýšení pevnosti v tahu, zvýšení pevnosti v ohybu, zvýšení modulu pružnosti v tahu, zvýšení pevnosti ohybu rázem, zvýšení tuhosti, zvýšení tvrdosti), lepší tvarová stabilita, tepelné vlastnosti (zvýšení tepelné vodivosti, zvýšení trvalé tepelné

odolnosti, zvýšení odolnosti proti žáru, zvýšení odolnosti proti tepelným rázům, modifikace délkové a objemové roztažnosti), omezení hořlavosti, zvýšení chemické odolnosti, zmenšení smrštění a zamezení vzniku dutin a prasklin, zmenšení nasákavosti, zlepšení vzhledu povrchu (zejména u výlisků), snížení výrobních nákladů, modifikace elektrických (dielektrických), nebo magnetických vlastností.

2.5.1 Rozdělení kompozitních materiálů

Na Obr. 2.7 je uvedeno jedno z možných rozdělení kompozitů. Hlavní členění je na částicové, vláknové a strukturální kompozity. Navíc každá z těchto větví obsahuje nejméně dvě další podskupiny specifikující velikost částic a jejich uspořádání, popřípadě jejich orientaci a vrstvení.



Obr. 2.7 Rozdělení kompozitních materiálů

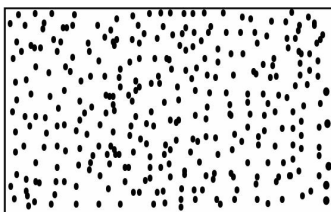
Částicové kompozity

Částicové kompozity se dělí podle velikosti částic na kompozity s velkými a s malými částicemi. Rozdíl mezi nimi je dán mechanismem jejich zpevnění a vyztužení.

Pojem velké částice určuje, že interakce mezi částicemi a matricí není jen na úrovni atomové nebo molekulové, ale je třeba uvažovat vzájemné působení a vliv povrchů částic. Většina těchto kompozitů má nespojitou fázi plniva tvrdší a pevnější než matrici. Zpevnění vede k omezení pohybu pojivové fáze v okolí každé částice. V tomto smyslu matrice převádí část namáhání na částice, které tak představují nosnou část materiálu. Stupeň zpevnění,

vedoucí ke zdokonalení fyzikálně-mechanických vlastností, je závislý na interakci a kvalitě vazby mezi částicemi plniva a matricí. Pro maločásticové kompozity jsou částice pojiva obecně mnohem menší (velikosti 10 až 100 nm). Zde ale hraje rozhodující roli interakce mezi částicemi a matricí na atomové a molekulární úrovni. Mechanismus zpevnění je založen na vzájemném působení částic na pohyb dislokací uvnitř pojiva. Využití těchto kompozitních materiálů je také v elektrotechnice, kde se používají například kompozity s anorganickými plnivými (částice mleté slídy a břidlice, mletý křemen, mastek, živec, mramorová a křemenná moučka, kaolin, křída, hydratovaný oxid hlinitý, titaničitan barnatý, křemičitan zirkoničitý, mleté ferity, saze a kovové prášky jako karbonylové železo, hliník), nebo kompozity s organickými práškovými plnivými (částicová plniva na bázi celulózy).

Ukázka částicového kompozitu je na Obr. 2.8.

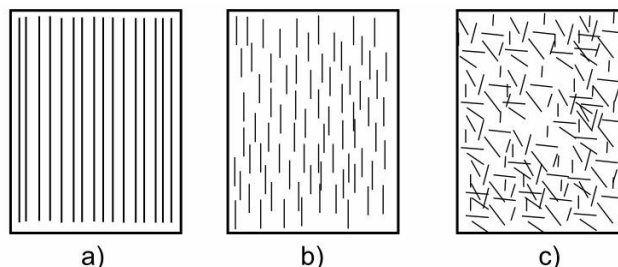


Obr. 2.8 Ukázka částicového kompozitu

Vláknové kompozity

Dalším druhem kompozitů jsou kompozity vláknové, to znamená že do matričního materiálu jsou vkládána vlákna. Vlákna zlepšují hlavně mechanické vlastnosti soustavy.

Vyztužovací vlákna mohou být ve vláknovém kompozitu krátká nebo dlouhá. Kompozity s dlouhými vlákny jsou označovány jako dlouhovláknové (vyztužené spojitými vlákny) a kompozity s krátkými vlákny jako krátkovláknové (vyztužené diskrétními vlákny). Krátkovláknové kompozity mají vlákna uspořádána v matici v jednom směru nebo nahodile. Znázornění uspořádání vláken je na Obr. 2.9. Jako krátkovláknové kompozity uvažujeme takové materiály, ve kterých délka vlákna ovlivňuje jejich vlastnosti. U vláknových kompozitů je hlavní úloha matrice pojít vlákna k sobě a chránit je před vnějšími vlivy.



Obr. 2.9 Uspořádání vláken v matici a) dlouhá vlákna, b) krátká vlákna usměrněná, c) krátká vlákna nahodile uspořádána

K vytvoření vláken jsou používány různé druhy materiálů.

Z anorganických přírodních materiálů je to azbest chryzotilového, nebo krokydolitového typu. Z organických materiálů to jsou vlákna na bázi celulózy. Vlákná z anorganických monokrystalů jsou například vysoce pevné monokrystaly ve formě jehlí či nitek- whiskry (vousy), nebo monokrystaly karbidu křemíku (SiC).

Z organických syntetických materiálů se používají plastová vlákna.

Další používané materiály jsou skleněná vlákna, která jsou většinou kruhového průřezu, jsou také používaná profilová vlákna. Základem těchto materiálů je sklo E (Eutal), což je bezalkalické hlinitoboritokřemičité sklo.

Skleněná vlákna se dělí podle průměrů vláken podle Tab. 2.2.

Tab. 2.2 Dělení skleněných vláken podle průměru

dělení	Průměr vláken
Velejemné	0,2 - 1,5 um
Středně jemné	2,5 - 3,5 um
Jemné	4,0 – 10 um
Hrubé	15 um
Tlusté	25 – 250 um

Dalším materiálem k tvorbě vláknitých materiálů jsou uhlíková vlákna. Ta se získávají pyrolýzou při teplotách 1 600 až 3 000 °C, z vláken viskóзовých, nebo polyakrylonitrilových.

Strukturované kompozity

Strukturované kompozity jsou obvykle tvořeny jak homogenním tak kompozitním materiálem. Vlastnosti výsledného materiálu závisí nejenom na vlastnostech jednotlivých složek, ze kterých se materiál skládá, ale také na geometrickém uspořádání a na výsledné struktuře kompozitu. Mezi nejběžnější strukturované kompozity patří především lamináty a sendvičové panely Obr. 2.10. Sendvičové panely jsou strukturované kompozity složené ze dvou silných vnějších plátů, které jsou oddělené vrstvou materiálu o nízké hustotě a nízké pevnosti. Vnější pláty přenášejí tahová a smyková napětí.



Obr. 2.10 Ukázka sendvičového panelu

2.5.2 Permitivita kompozitů

Pro určení permitivity směsné soustavy je uváděno v literatuře několik podobných rovnic lišící se pouze mírou použité aproximace. V technické praxi se často používá více vztahů pro výpočet permitivity složené soustavy. Lichteneckerovy směsné vztahy. Jeho obecný tvar lze vyjádřit výrazem [6]

$$\epsilon_s^{\cdot k} = \sum_{i=1}^n v_i \epsilon_i^{\cdot k}, \quad (28)$$

pro výpočet dvousložkové soustavy lze použít tvar [6]

$$\epsilon_s^{\cdot k} = v_1 \epsilon_1^{\cdot k} + v_2 \epsilon_2^{\cdot k}, \quad (29)$$

kde ϵ_s^{\cdot} je permitivita soustavy, ϵ_2^{\cdot} je permitivita matričního prostředí, ϵ_1^{\cdot} je permitivita částic v matričním prostředí a k je empirický parametr, závislí na tvaru a orientaci částic (sériové, paralelní, chaotické) složené soustavy, který může nabývat jakékoliv hodnoty v rozmezí $\langle -1; 1 \rangle$. Pro krajní hodnoty odpovídá rovnice vztahům dosazení za k :

$k \rightarrow 1$ paralelně uložené částice

$k \rightarrow -1$ sériově uložené částice

$k \rightarrow 0$ chaoticky uložené částice

v_1 objemové procento matrice a v_2 je objemové procento vložených částic do matričního prostředí.

Výpočet celkové permitivity u paralelně rozložených částic tedy $k \rightarrow 1$ se spočítá podle výrazu [6]

$$\epsilon_s^{\cdot} = v_1 \epsilon_1^{\cdot} + v_2 \epsilon_2^{\cdot}. \quad (30)$$

Výpočet celkové permitivity u sériově rozložených částic tedy $k \rightarrow -1$ se spočítá podle výrazu [6]

$$\frac{1}{\epsilon_s^{\cdot}} = v_1 \frac{1}{\epsilon_1^{\cdot}} + v_2 \frac{1}{\epsilon_2^{\cdot}}. \quad (31)$$

Výpočet celkové permitivity u chaoticky rozložených částic tedy $k \rightarrow 0$ se spočítá podle tzv. Lichteneckerova logaritmického výrazu [6]

$$\log \varepsilon'_s = v_1 \log \varepsilon'_1 + v_2 \log \varepsilon'_2. \quad (32)$$

Lichteneckerův logaritmický vztah popisuje složené soustavy statistického i matričního typu s libovolnou hodnotou poměrného objemového dílu všech složek soustavy s částicemi libovolného či neurčitěho tvaru při chaotickému uspořádání složek. Popis dvousložkové složené soustavy bude tím přesnější, čím menší bude poměr permitivit obou složek. Při odvozování svých vztahů uvažoval Lichtenecker dvě složky o nejvyšším poměru $\varepsilon'_1 / \varepsilon'_2 = 4$.

Dalším vztahem pro výpočet permitivity složených soustav je Maxwellův směsný vztah a jeho tvar je [6]

$$\frac{\varepsilon'_s - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_2} = 3v_1 \frac{\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_1 + 2\varepsilon'_2}. \quad (33)$$

Posledním vztahem pro výpočet celkové permitivity složených soustav je Bütcherův směsný vztah pro soustavu s kulovými částicemi a spočítá se podle výrazu [6]

$$\frac{\varepsilon'_s - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_s} = 3v_1 \frac{\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_1 + 2\varepsilon'_s}. \quad (34)$$

2.5.3 Kompozity v silovém poli

Při návrhu kompozitního materiálu je třeba znát vlastnosti jednotlivých materiálů soustavy, ale i vztah těchto vlastností v soustavě mezi sebou. Ke zjištění přiměřeného směsného vztahu se používá teorie složených soustav. Výsledná vlastnost X_s mnohasložkové soustavy složené z materiálů o vlastnostech X_1, X_2, \dots, X_n a poměrných objemových dílech složek v soustavě v_1, v_2, \dots, v_n je určena obecně funkcí [6]

$$X_s = F(X_1, X_2, \dots, X_n, v_1, v_2, \dots, v_n), \quad (35)$$

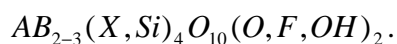
přičemž [6]

$$\sum_{i=1}^n v_i = 1. \quad (36)$$

Složené soustavy v silovém poli by neměly mít permitivity příliš rozdílné. Při velkých rozdílech dochází k odlišnému elektrickému namáhání v soustavě a tím se i snižuje životnost takové složené soustavy.

2.6 Slída v elektrotechnice

Slída je přírodní anorganický izolant a má v elektrotechnice velký význam jak ve vysokonapěťové, tak v nízkonapěťové izolační technice a ve vysokofrekvenční technice. Ze slídy se dělají např. vložky komutátorů. Díky silným kovalentním vazbám kyslíku a křemíku O-Si ve vrstvách oxidu křemičitého, je slída stabilní materiál. Při použití slídy se využívají zejména její izolační a teplovzdorné vlastnosti. Používá se jako dielektrikum v kondenzátorech a jako materiál pro izolační desky. Je tvořena vrstevnou strukturou krystalů a proto se slída snadno štípe až na tloušťky 0,05 mm. Nachází se v přírodě v mnoha modifikacích a její složení charakterizuje obecný vzorec [5]



A představuje draslík, nebo sodík, baryum, cesium, amonný iont; *B* hliník, lithium, železo, zinek, chrom, vanad, mangan, hořčík; *X* hliník, bor, železo.

Pro elektroizolační účely se v elektrotechnice využívají muskovit a flogopit. Muskovit je bezbarvá, světlehnědá až světlazelená draselná slída – kyselý křemičitan hlinitodraselný $KAl_2AlSi_3O_{10}(F, OH)_2$ s kalcinační teplotou 700-800 °C a s charakteristickými elektrotechnickými vlastnostmi $tg\delta = 1-3 \cdot 10^{-4}$, $\epsilon_r = 6-7$, $E_p = 60 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$, $\rho_v = 10^{16} \Omega \cdot \text{m}$. Flogopit je tmavá, jantarová, zlatavá až šedá hořečnatá slída – kyselý křemičitan hlinitodraselnohořečnatý $KMg_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$ s kalcinační teplotou 900 – 1000 °C s charakteristickými elektrotechnickými hodnotami $tg\delta = 1-3 \cdot 10^{-5}$, $\epsilon_r = 5-6$, $E_p = 45 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$, $\rho_v = 10^{14} \Omega \cdot \text{m}$. Dielektrické ztráty $tg\delta$ pro nízké frekvence s teplotou rostou a pro vyšší frekvence klesají. Elektrická pevnost značně klesá s obsahem vody. Teplotně je nezávislá do 400 – 450 °C. Slída si uchovává prakticky neměnné vlastnosti až do její kalcinační teploty, při této teplotě ztrácí ve své struktuře vázanou vodu.

2.7 Epoxidové pryskyřice

Epoxidové pryskyřice patří do skupiny reaktoplastů, takže jejich vytvrzení je prováděno teplem nebo chemicky. Pod pojmem epoxidová pryskyřice se rozumí sloučenina, která obsahuje v molekule epoxidovou (oxiranovou) skupinu. Je možné aplikovat tyto pryskyřice jako lepidla, zalévací a lisovací hmoty, pojiva pro lamináty a jako matrice kompozitních materiálů v elektrotechnice. Výhodou epoxidové pryskyřice je, že při vytvrzování dochází k jen malému celkovému polymeračnímu smrštění okolo 2% a při vytvrzování se neodštěpují vedlejší produkty. Právě tyto vlastnosti jsou využívány k tvorbě výrobků, u kterých jsou velké požadavky na přesné rozměry s malými tolerancemi na změny velikosti.

Epoxidová pryskyřice má velmi dobrou přilnavost k materiálu, který je použit jako plnivo. Vytvrzené epoxidové pryskyřice mají dobré mechanické a především elektrické

vlastnosti v široké oblasti teplot. Jejich elektroizolační vlastnosti jsou dobré, protože mají velkou odolnost proti vniku vody, roztokům alkálií, kyselin a některým rozpouštědlům. Její vhodnost využití je také díky samozhášecím vlastnostem. Základní vlastnosti epoxidových pryskyřic (modul pružnosti, pevnost v tahu, hustota a maximální teplota) jsou v tabulce Tab. 2.3.

Tab. 2.3: Základní mechanické vlastnosti epoxidových pryskyřic

Modul pružnosti E_m [MPa]	Modul pružnosti ve smyku G_m [MPa]	Pevnost v tahu σ_{pm} [MPa]	Hustota ρ [kg.m ⁻³]	Max. teplota T_{max} [°C]
4500	1600	130	1200	90 - 200

3 Experimentální část

3.1 Zkušební vzorky

Předmětem zkoumání byly vzorky z epoxidové licí pryskyřice poskytnuté firmou ABB, jejichž složení firma z obchodních důvodů nesdělila. Tento materiál firma používá k zalévání části elektrických rozvaděčů (traf, průchodek atd.). Byly vyrobeny tři sady vzorků po 10 kusech s různým hmotnostním plnění 0, 20 a 30 % mletou práškovou slídou o zrnitosti 40 μm druhu muskovit.

Ke zjištění dielektrických vlastností zkoumaných vzorků bylo potřeba znát rozměry vzorků a elektrod. Tloušťky vzorků byly změřeny digitálním mikrometrickým měřidlem na 20 místech každého vzorku. Tloušťky jednotlivých vzorků s odchylkami jsou zaznamenána v tabulce Tab. 3.1

Tab. 3.1 Tloušťky vzorků

Vzorek	tloušťka vzorku
0% plnění	$2,00 \pm 1,50\%$
20% plnění	$1,99 \pm 1,22\%$
30% plnění	$2,01 \pm 1,53\%$

Vzorky nemusely být povrchově opracovány, protože byly hladké, ale byly mírně zkroucené. Jejich pokroucení bylo způsobeno vytvrzováním, ale tento problém byl eliminován zatížením elektrodového systému 10 kg závažím. Toto závaží bylo dostatečné zatížení ke správnému přilnutí elektrodového systému k měřenému vzorku a zabránění vzniku vzduchových mezer, které by ovlivňovaly měření.

3.2 Výroba zkušebních vzorků

Epoxidová licí pryskyřice složená z pěti komponent se vyhřála na teplotu 60°C a za stálého míchání se do ní přisypávala jemně mletá slída o zrnitosti 40 μm . Množství slídy se přimíchávalo podle toho, jakého hmotnostního procenta měl být vzorek vytvořen. Míchání probíhalo tak dlouho, dokud nebyly částičky slídy homogenně rozloženy v epoxidové pryskyřici. Dále byla nádoba se směsí dána do vývěvy, v níž se pomalu snižoval tlak, až se ze směsi začaly uvolňovat vzduchové bublinky. Snižování tlaku muselo být prováděno opatrně, protože při velkém podtlaku by mohla směs vystříkávat z nádoby. Směs byla podrobena podtlaku tak dlouho, dokud nepřestaly vzduchové bublinky ze směsi unikat. Po přípravě směsi se nalila do připravené formy rozehřáté na 60 °C. Forma umožňovala odlít 10 kusů vzorků o velikosti 110 x 110 x 2 mm. Aby vytvořené vzorky byly hladké a zabránilo se

nalepování směsi na formu, byla forma jemně natřena separačním prostředkem - silikonovou vazelinou. Forma se směsí byla opět vložena do vývěvy, aby se odstranily zbytkové vzduchové bubliny, které se objevili, při přelévání směsi do formy. Postup odsávání vzduchu probíhal stejně jak u prvního odsávání vzduchu. Veškerá operace vytváření vzorků probíhala za teploty směsi 60 °C.

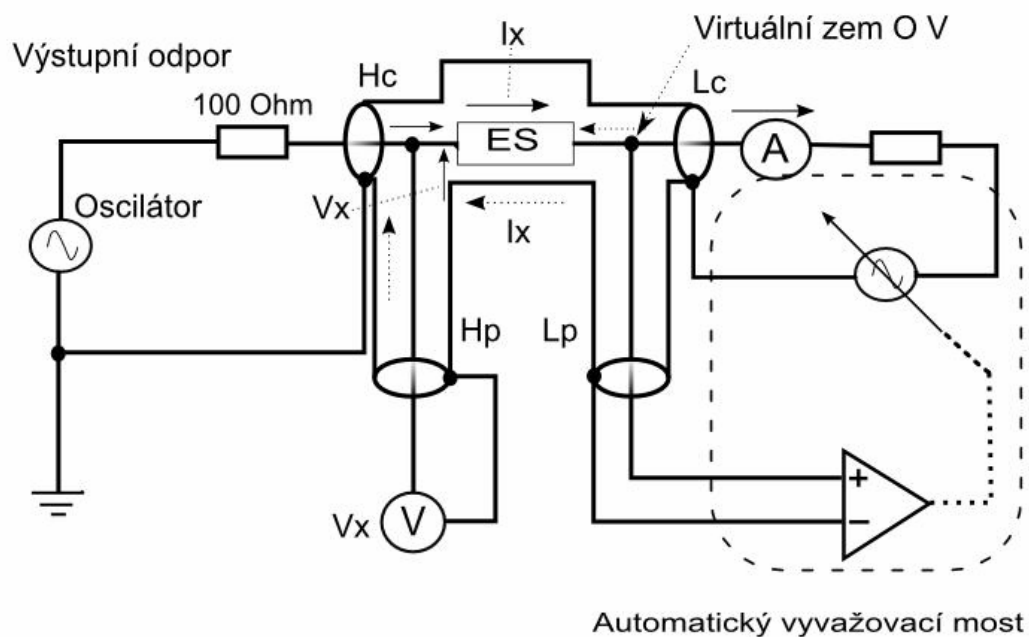
Po této přípravě se forma vložila do sušárny k vytvrzení. V první fázi proběhlo předtvrzení při teplotě 80 °C po dobu dvou hodin a následně v druhé fázi probíhalo vlastní vytvrzování při teplotě 140 °C po dobu osmi hodin.

Po vyjmutí z formy, byly vzorky zbaveny silikonové vazelíny isopropylalkoholem, který nenapadá povrch vzorku.

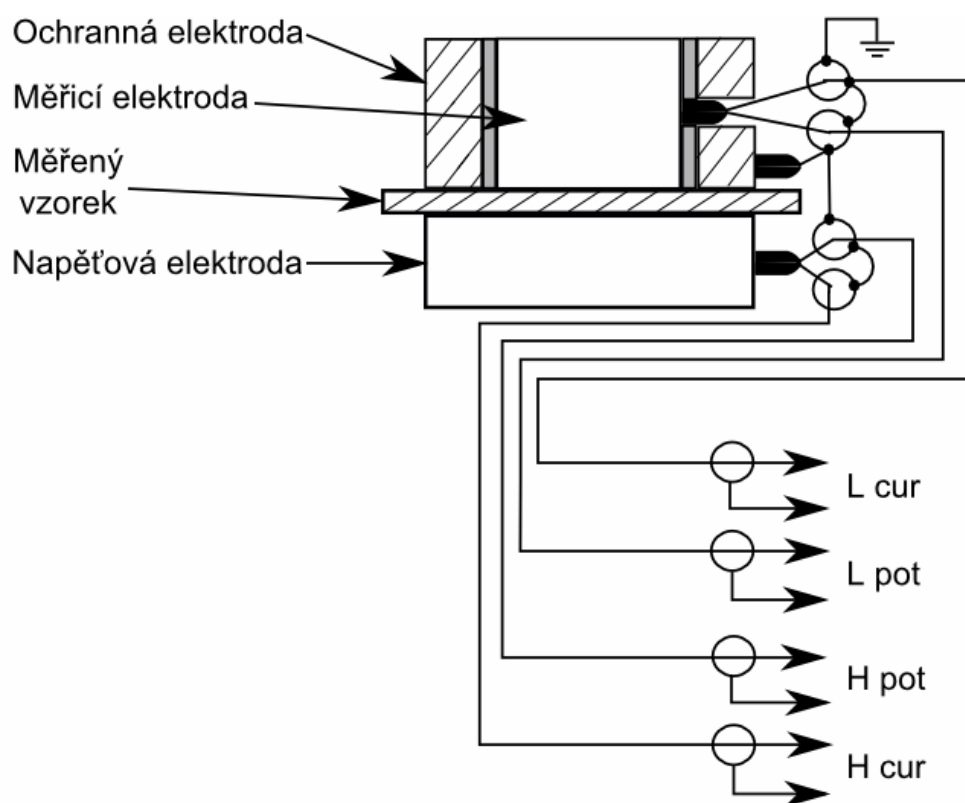
3.3 Měřicí zařízení

K měření kmitočtových závislostí vzorků byl použit digitální přístroj HP 4284A od firmy Hewlett-Packard. Je to přesný RLCG měřič, který měří v kmitočtové rozsahu od 20 Hz do 1MHz. Toto zařízení komunikuje s PC přes sběrnici GPIB (General Purpose Interface Bus). Je to standard vytvořený firmou HP k realizaci automatizovaného měřicího pracoviště. Komunikace PC a HP 4284A je prostřednictvím PCI karty a obslužného softwaru Agilent VEE nainstalovaného v PC. Je to grafický programovací jazyk sloužící k sestavení měřicího obvodu a jeho nastavení PC. V tomto programu se nastavovaly veškeré měřicí průběhy a naměřená data byla posílána do tabulkového programu Microsoft Excel. V tomto programu byly hodnoty z HP 4284A vzorku $tg\delta$ a kapacita C dále zpracovávány a přepočítávány na permitivitu a ztrátové číslo.

Měřicí přístroj HP 4284A vyhodnocuje vlastnosti dielektrického materiálu sledováním úbytku napětí na měřeném objektu, proudu jím procházející a fázi mezi nimi. Měřicí schéma přístroje je znázorněn na Obr. 3.1.

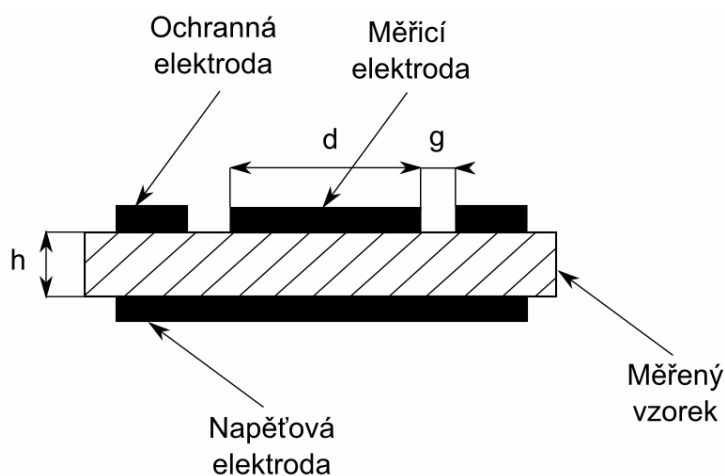


Obr. 3.1 Princip měření přístroje HP 4284A (ES-elektroodový systém)



Obr. 3.2 Zapojení elektrodového systému k HP 4284A z Obr. 3.1

Měření dielektrických vlastností vzorků byla prováděna v tříelektrodovém měřicím kondenzátoru, který byl propojen s měřicím přístrojem čtyřmi stíněnými kabely jehož uspořádání je na Obr. 3.2. Tento systém byl zvolen, protože se eliminují chyby parazitních okrajových kapacit elektrod, které vznikají u dvuelektrodového systému. Elektrody také nemohly být napařovány z důvodů, že byl pozorován vliv vlhkosti na dielektrické vlastnosti vzorků. U napařených elektrod by vlhkost musela pronikat do vzorku pod elektrodami a tím by se značně prodloužila stabilizace vzorku na požadovanou vlhkost.



Obr. 3.3 Uspořádání tříelektrodového systému

Relativní permitivita se spočítá podle výrazu [5]

$$\varepsilon' = \frac{C_x}{C_0}, \quad (37)$$

kde C_x je kapacita měřicího kondenzátoru s vloženým vzorkem změřená přístrojem HP 4284A a C_0 je geometrická kapacita měřicího kondenzátoru. Tato kapacita se vypočítává z geometrických rozměrů tříelektrodového měřicího systému u něhož se místo permitivity vzorku počítá s vakuem. Pro výpočet geometrické kapacity platí výraz [5]

$$C_0 = \varepsilon_0 \cdot \frac{S_{ef}}{h}, \quad (38)$$

kde ε_0 je permitivita vakua ($\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$) h je tloušťka vzorku a S_{ef} je efektivní plocha měřicí elektrody pro niž platí výraz [5]

$$A = \frac{\pi(d+g)^2}{4}, \quad (39)$$

kde d je průměr měřicí elektrody a g je mezera mezi měřicí elektrodou a ochranou elektrodou.

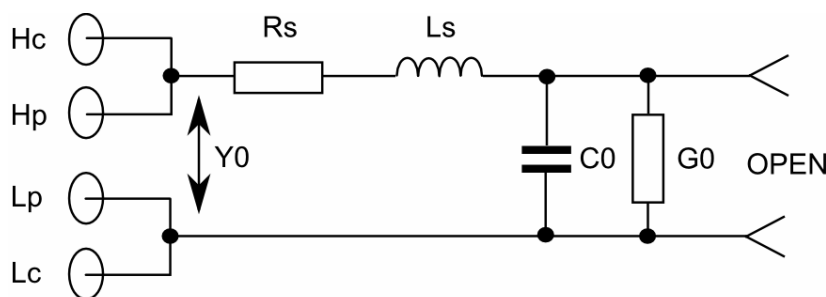
Vyhodnocení měřených výsledků měřicího přístroje HP 4284A je ovlivňováno chybami způsobenými přívodními vodiči. Tyto chyby jsou způsobené délkou vodičů tedy jejich impedancí, indukčností a kapacitou mezi středovým vodičem a stíněním. Přístroj má v sobě funkce, které tento problém dokáží eliminovat a jsou to funkce OPEN a SHORT. Po spuštění funkcí, přístroj podrobí celým svým kmitočtovým rozsahem měřicí obvod a chybové hodnoty vzniklé propojením si uloží do paměti. Při měření zkoumaných vzorků už s těmito chybovými hodnotami počítá a vhodným způsobem je kompenzuje. Po této operaci měřené hodnoty odpovídají dielektrickým vlastnostem vzorku.

Korekcí OPEN (naprázdno) se eliminují chyby, které by byly zanášeny do měření rozptylovou admitancí Y_0 . Ta je popsána vzájemnou kapacitou C_0 a vodivostí G_0 . Schéma měřicího obvodu je na Obr. 3.4. Protože platí výraz [7]

$$R_s + j\omega L_s \ll \frac{1}{G_0 + j\omega C_0}, \quad (40)$$

tak hodnoty R_s a L_s se mohou zanedbat a pro určení admitance Y_0 lze použít výraz [7]

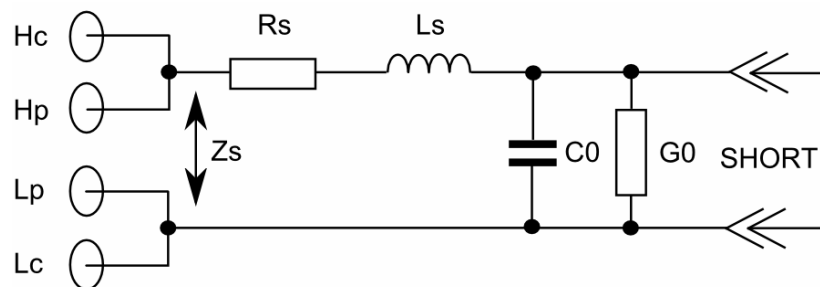
$$Y_0 = G_0 + j\omega C_0. \quad (41)$$



Obr. 3.4 Schéma měřicího obvodu při použití korekce OPEN

Korekcí SHORT (na krátko) se eliminují chyby, které vznikají délkou kabelu, tedy impedancí R_s a indukčností L_s . Schéma měřicího obvodu je na Obr. 3.5. Výpočet celkové impedance obvodu lze vyjádřit výrazem [7]

$$Z_s = R_s + j\omega L_s. \quad (42)$$



Obr. 3.5 Schéma měřicího obvodu při použití korekce SHORT

3.4 Měřicí pracoviště

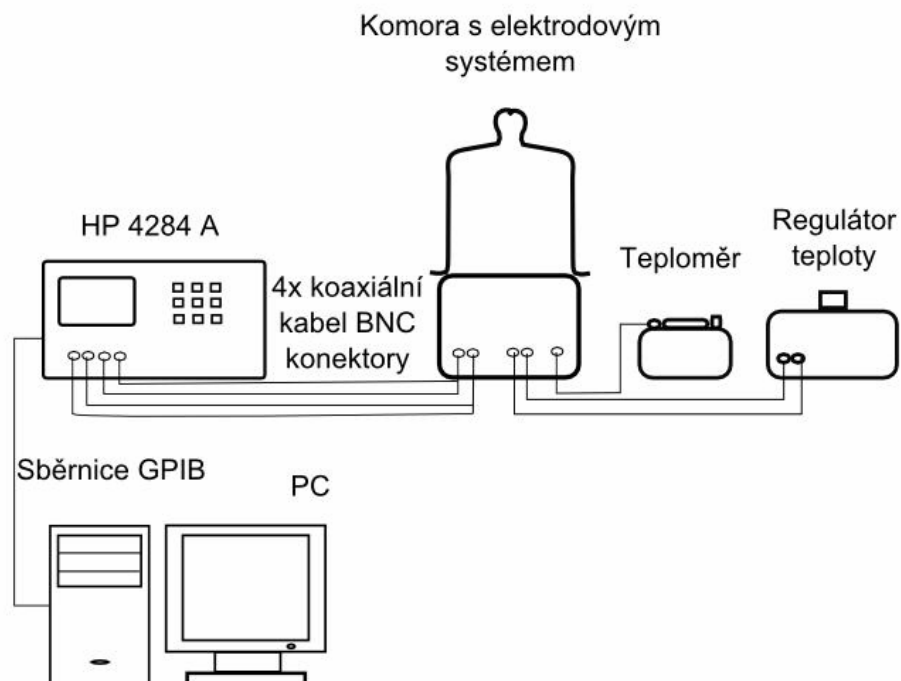
Měření v komoře Tettex

Měření byla prováděna na dvou pracovištích. Na prvním pracovišti byly zjišťovány kmitočtové závislosti dielektrických vlastností vzorků při 0 % relativní vlhkosti ve vyhřívané komoře Tettex. Při této vlhkosti byly nastavovány teploty od 24 °C (teplota okolí v laboratoři) do teploty 120 °C. Schéma zapojení pracoviště je znázorněno na Obr. 3.6. Elektroodový systém byl přikryt skleněným zvonem, aby nebyly vzorky ovlivňovány vnějšími podmínkami laboratoře. Uspořádání elektroodového systému vloženého do komory Tettex je na Obr. 3.7.

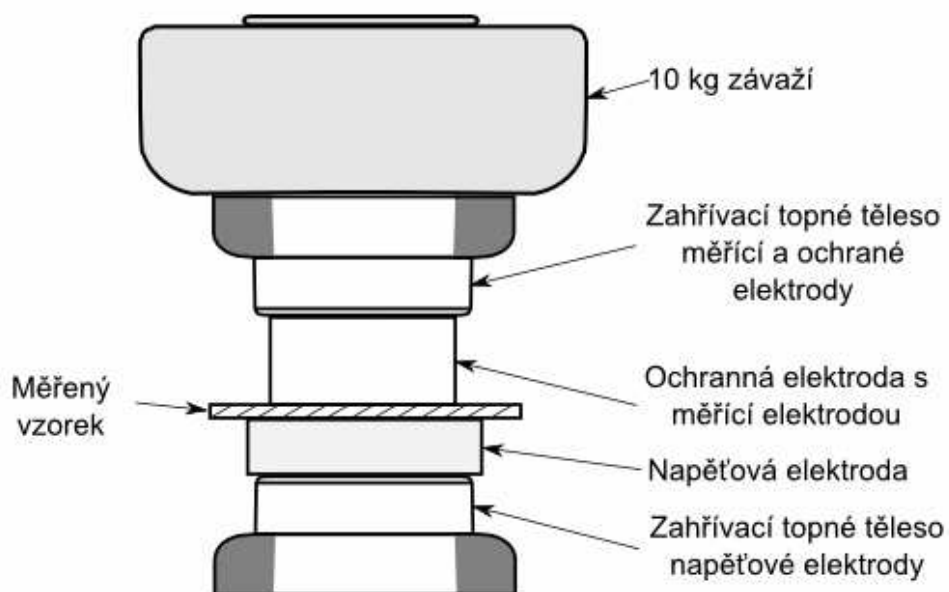
Popis měření

Aby vzorky měly relativní vlhkost 0 %, byly po celou dobu vloženy v exsikátoru, který obsahoval molekulová síta. Den před samotným měřením, byl vzorek vyjmut z exsikátoru a vložen do elektroodového systému. Elektroodový systém byl zatížen 10 kg závažím, které zajišťovalo dostatečné přilnutí elektrod ke vzorku. Elektroodový systém se vzorkem byl přikryt skleněným zvonem, a byl vyhřát na teplotu 120 °C. Vyhřátí bylo provedeno, za účelem zbavení se zbytkové vlhkosti ve vzorku. Vzniklá měřicí komora byla také vyplněna sáčky s molekulovým sítem, zajišťující pohlcení zbytkové vlhkosti. Druhý den byla komora se vzorkem vychladlá na teplotu laboratoře a mohlo proběhnout měření. V komoře byl vložen větráček o velikosti 60 x 60 mm, zajišťující nucenou cirkulaci vzduchu a tím dosažení homogenních podmínek v celé komoře.

Měření bylo, z důvodů dosažení provozní teploty měřicího přístroje, spuštěno po 30 minutách od jeho zapnutí. V průběhu samotného měření byl, po dosažení požadované teploty, vzorek 15 minut temperován. Teplota byla měřena odporovým platinovým teploměrem (100 Ω/0 °C), umístěným v jedné z měřicích elektrod.



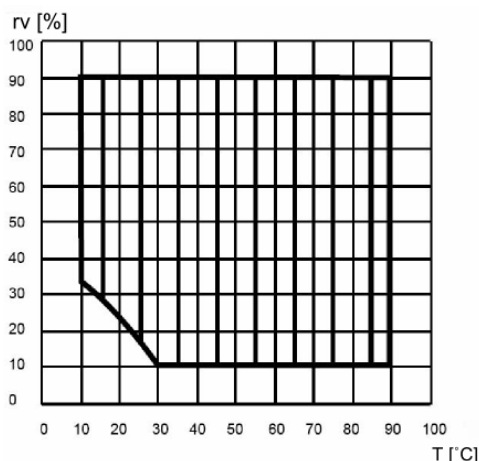
Obr. 3.6 Schéma zapojení pracoviště s komorou Tettex



Obr. 3.7 Uspořádání elektrodového systému v komoře Tettex

Měření v klimatické komoře Climacell 111

Na druhém pracovišti byly sledovány kmitočtové závislosti dielektrických vlastností při změně relativní vlhkosti. Toto měření bylo prováděno v klimatické komoře Climacell 111. Je to chladicí inkubátor s řízenou vlhkostí, který dokáže měnit teplotu od 0 do 99,9 °C a relativní vlhkost od 10 do 90 % v různých časových režimech. Teplota v komoře je měřená teplotním čidlem Pt 100 a vlhkost je měřená kapacitním čidlem. Vzájemný vztah provozních hodnot teploty a relativní vlhkosti ukazuje diagram na Obr. 3.8.

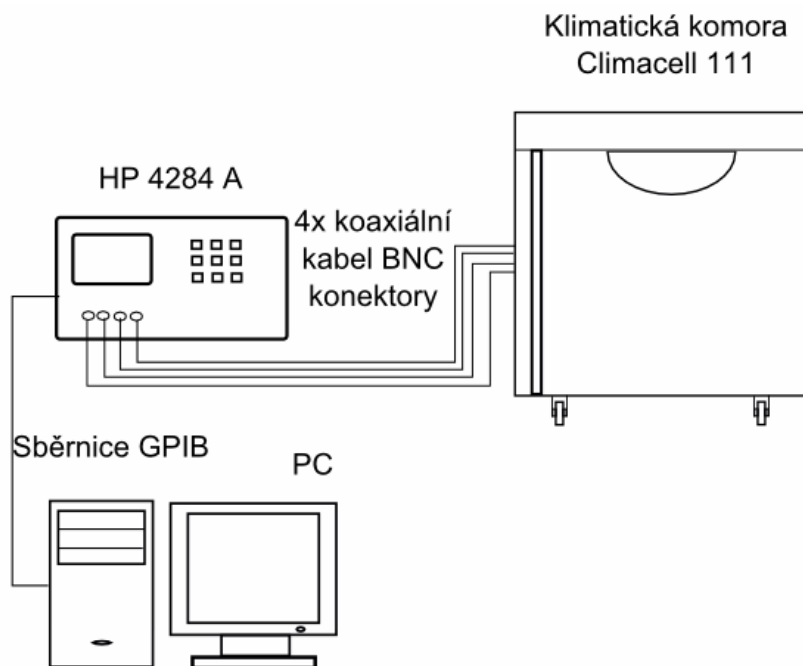


Obr. 3.8 Vzájemný vztah provozní teploty T [°C] a relativní vlhkosti rv [%]

Kmitočtové závislosti byly měřeny při stejné teplotě 24 °C a různých relativních vlhkostech 30 %, 55 % a 75 %. K dosažení těchto vlhkostí, byly vzorky uloženy v exsikátorech s nasycenými roztoky jejichž složení je v Tab. 3.2. Měření proběhlo v již nastavené klimatické komoře na požadované hodnoty teploty a relativní vlhkosti. Schéma zapojení pracoviště je znázorněno na Obr. 3.9.

Tab. 3.2 Nasycené roztoky pro vytvoření konstantní relativní vlhkosti

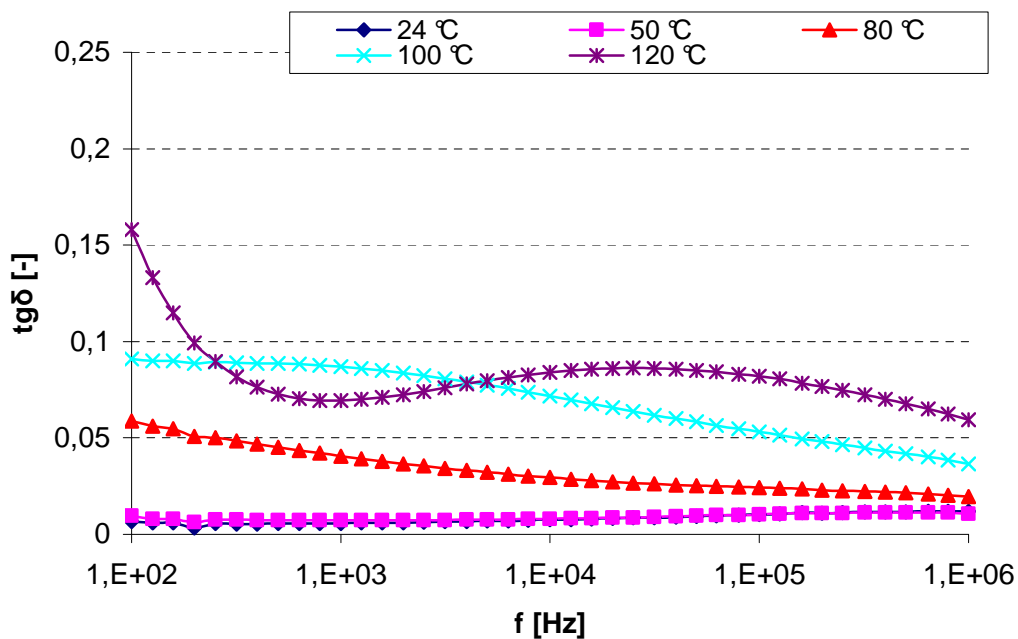
Relativní vlhkost [%]	Pevná fáze	Název pevné fáze
30	Vlhkost v laboratoři	
55	$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	Dusitan hořečnatý
75	NaCl	Chlorid sodný



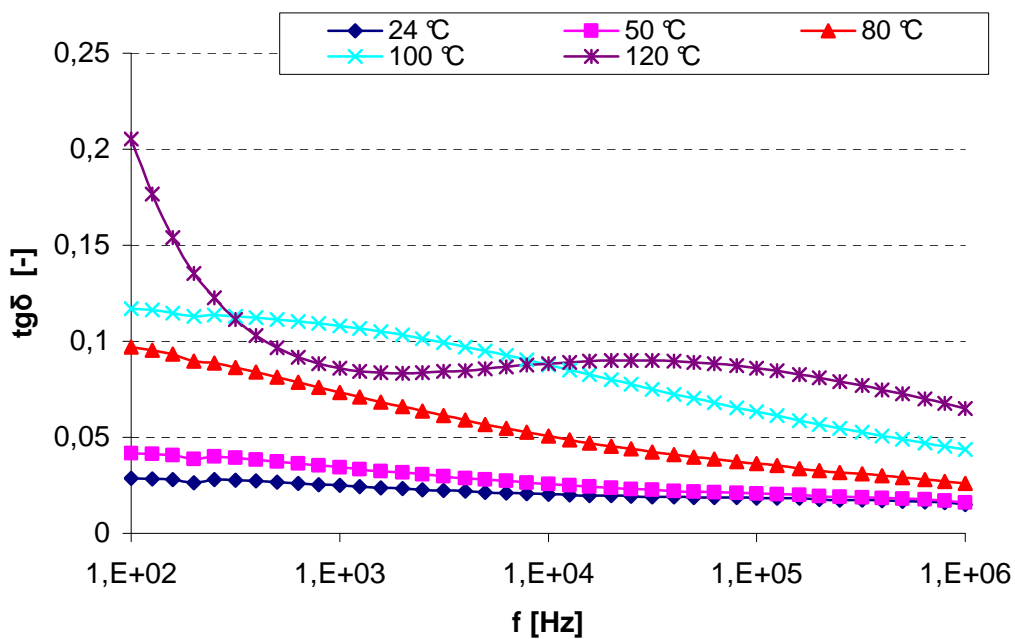
Obr. 3.9 Schéma zapojení pracoviště s klimatickou komorou Climacell 111

3.5 Zhodnocení výsledků měření

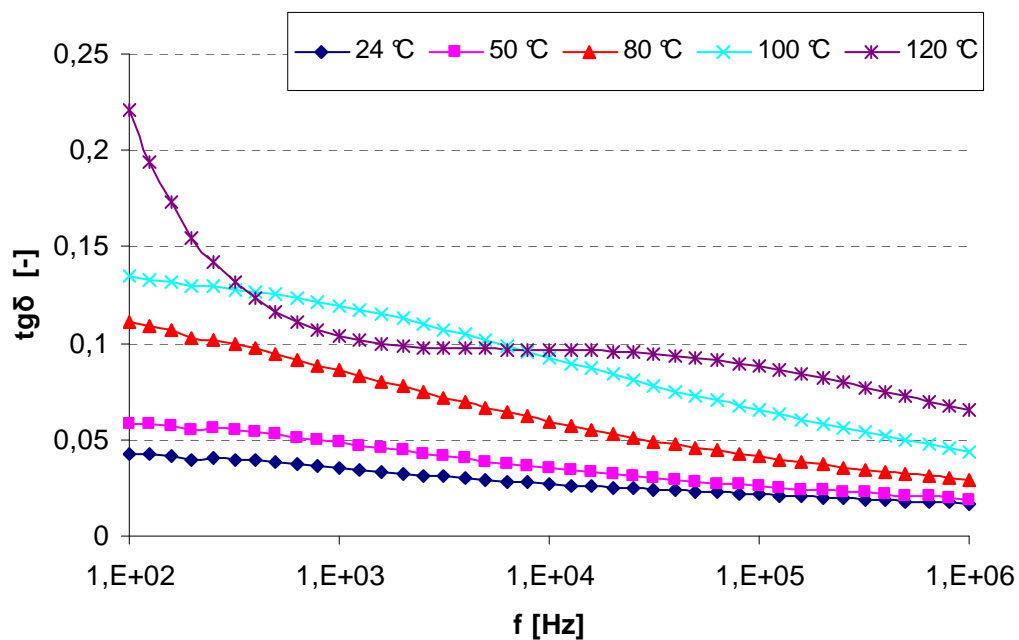
Cílem práce bylo sledování dielektrických vlastností vzorků epoxidové licí hmoty s 0 %, 20 % a 30 % hmotnostním plnění mletou slídou o zrnitosti 40 μm . Vlastnosti byly sledovány v závislosti na plnění mletou slídou, na teplotě a na relativní vlhkosti vzduchu.



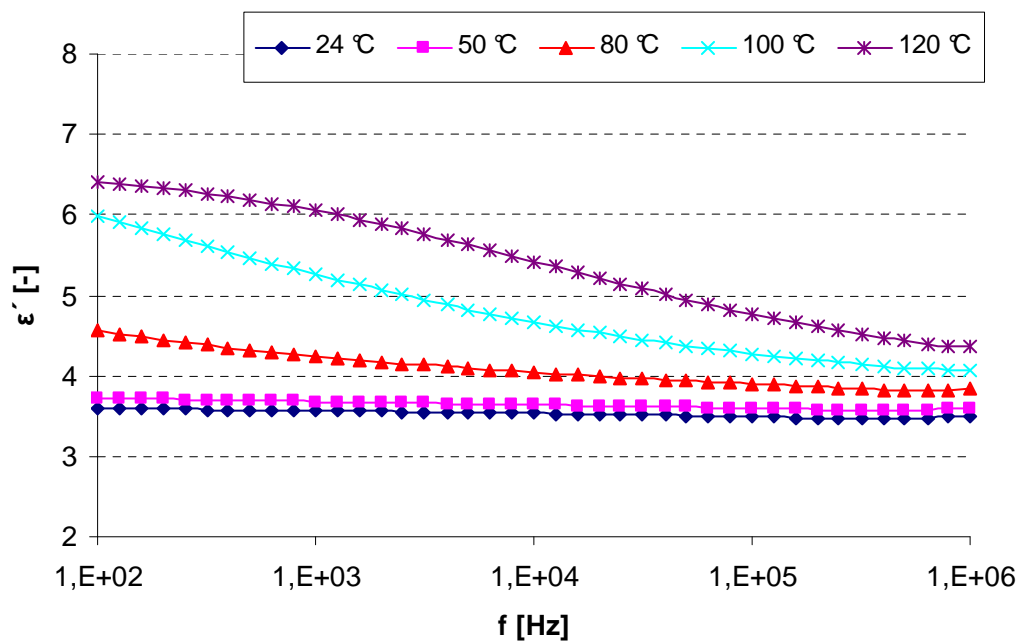
Obr. 3.10 Kmitočtová závislost $tg\delta$ vzorku plněného 0 % slídou s relativní vlhkostí 0 % a s teplotou jako parametrem



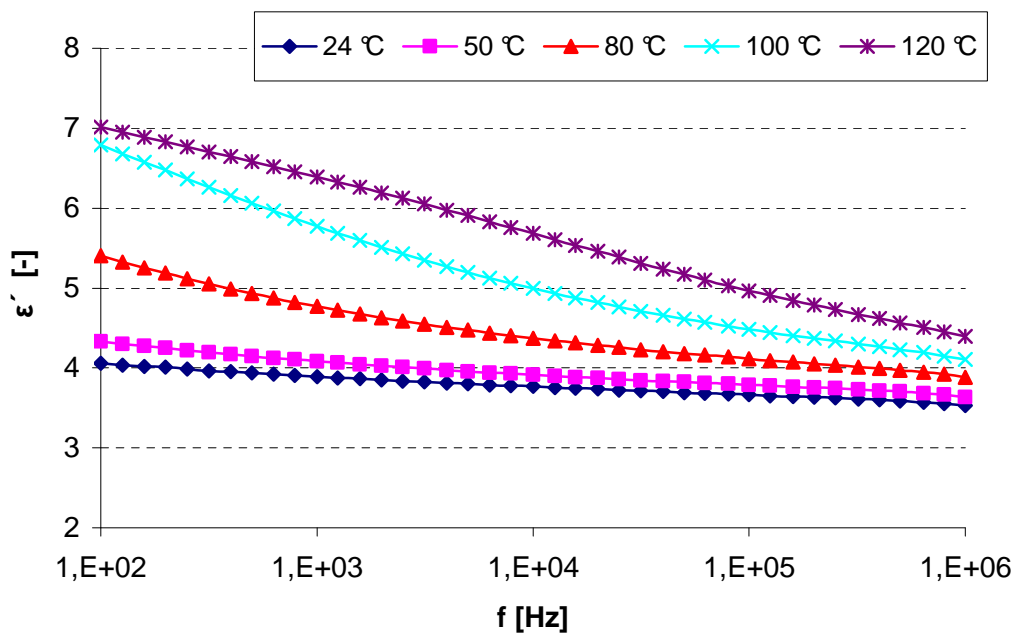
Obr. 3.11 Kmitočtová závislost $tg\delta$ vzorku plněného 20 % slídou s relativní vlhkostí 0 % a s teplotou jako parametrem



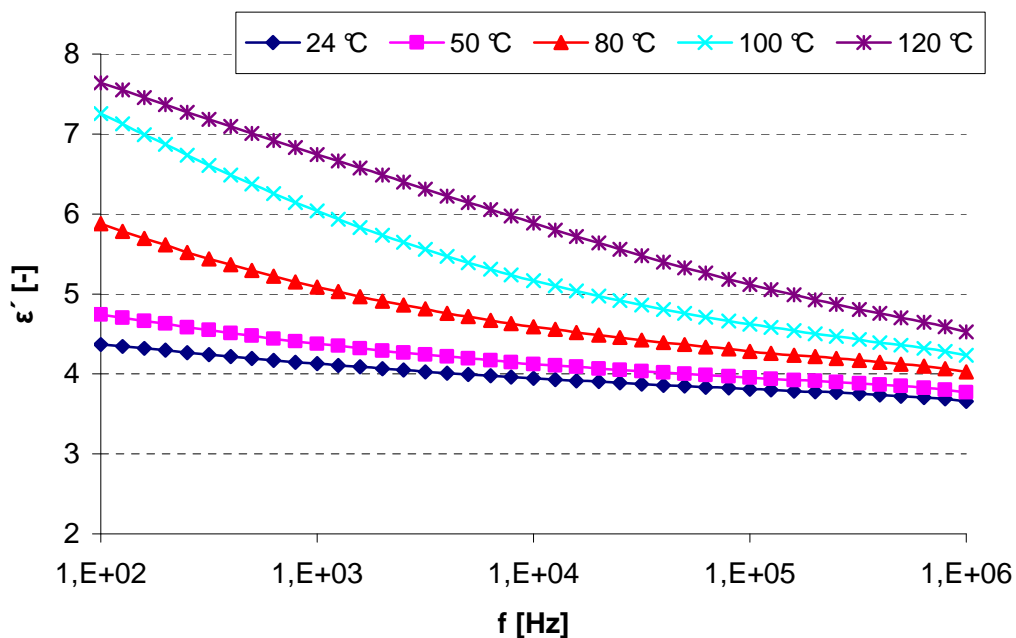
Obr. 3.12 Kmitočtová závislost $tg\delta$ vzorku plněného 30 % slídou s relativní vlhkostí 0 % a s teplotou jako parametrem



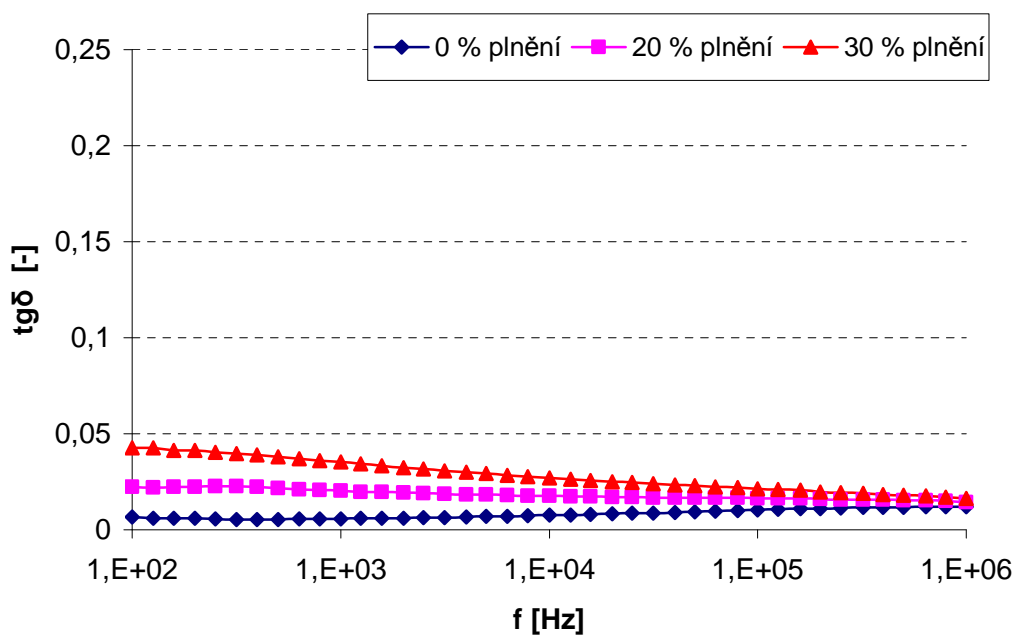
Obr. 3.13 Kmitočtová závislost ϵ' vzorku plněného 0 % slídou s relativní vlhkostí 0 % a s teplotou jako parametrem



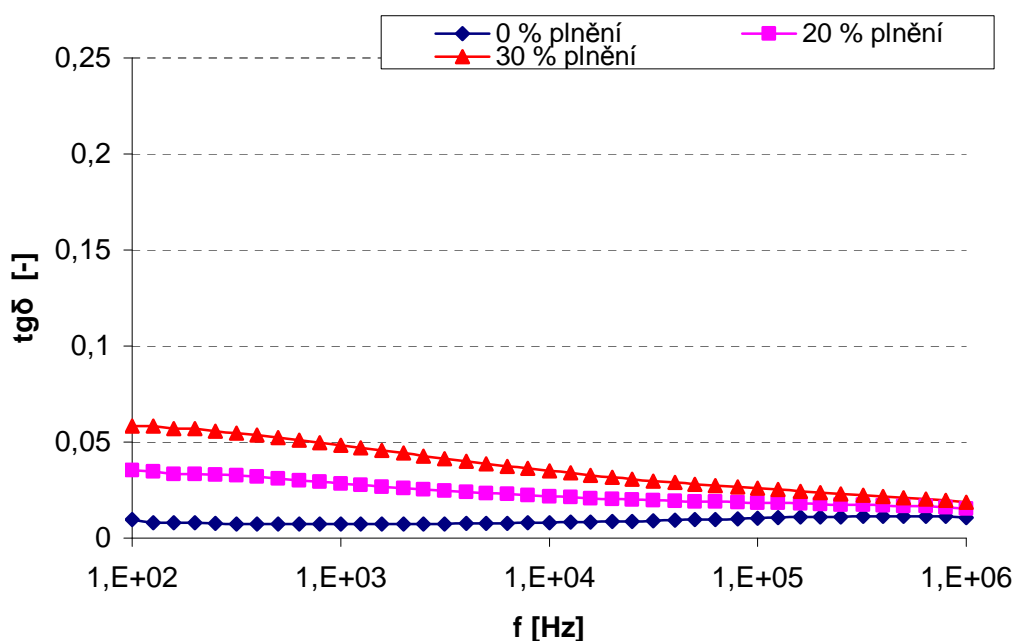
Obr. 3.14 Kmitočtová závislost ϵ' vzorku plněného 20 % slídou s relativní vlhkostí 0 % a s teplotou jako parametrem



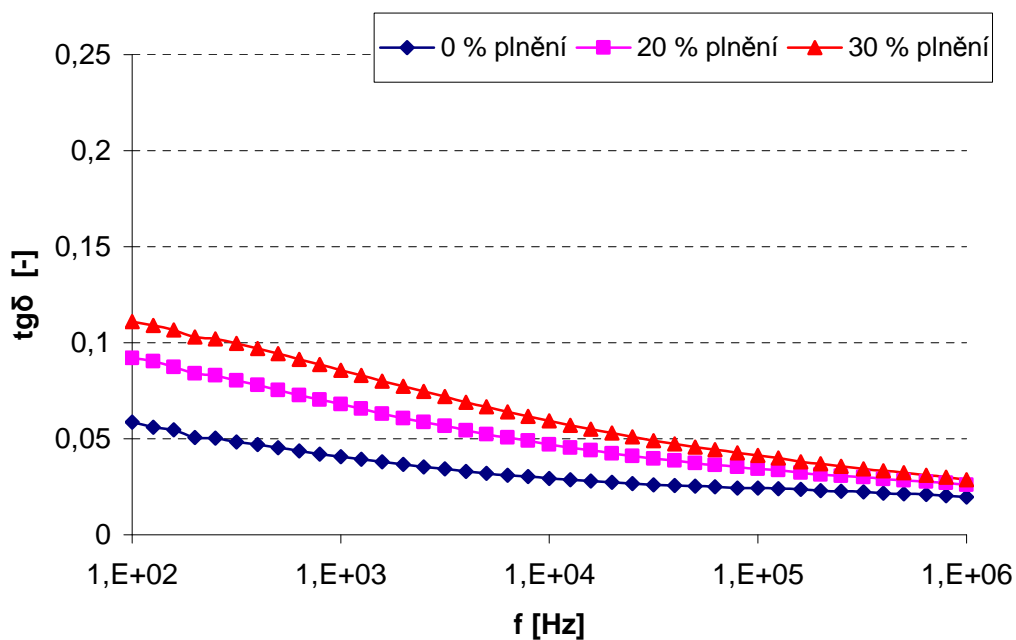
Obr. 3.15 Kmitočtová závislost ϵ' vzorku plněného 20 % slídou s relativní vlhkostí 0 % a s teplotou jako parametrem



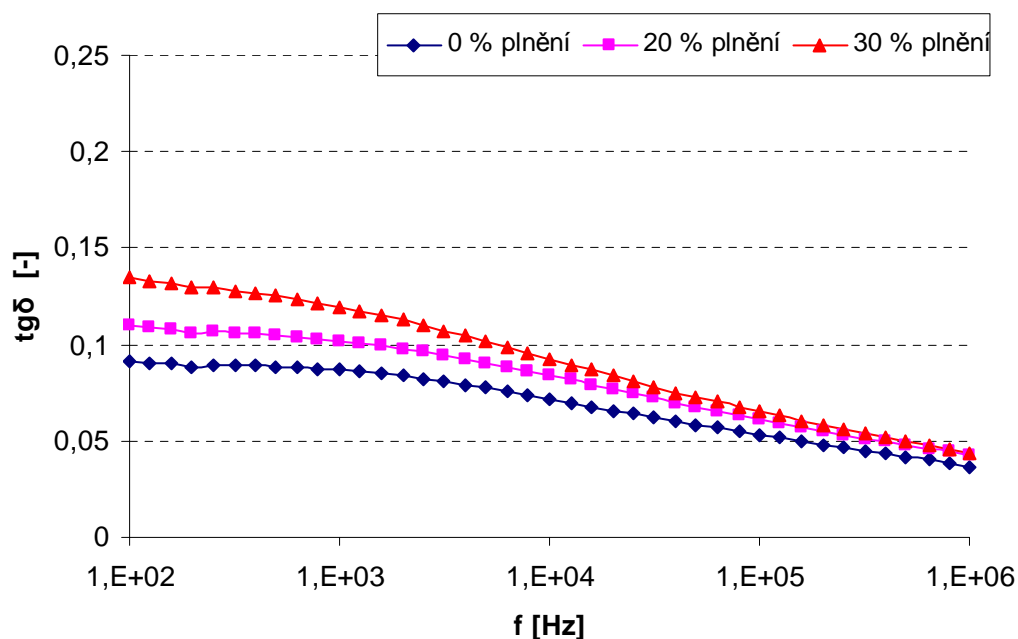
Obr. 3.16 Kmitočtová závislost $tg\delta$ při teplotě 24 °C s relativní vlhkostí 0 % a s plněním jako parametr



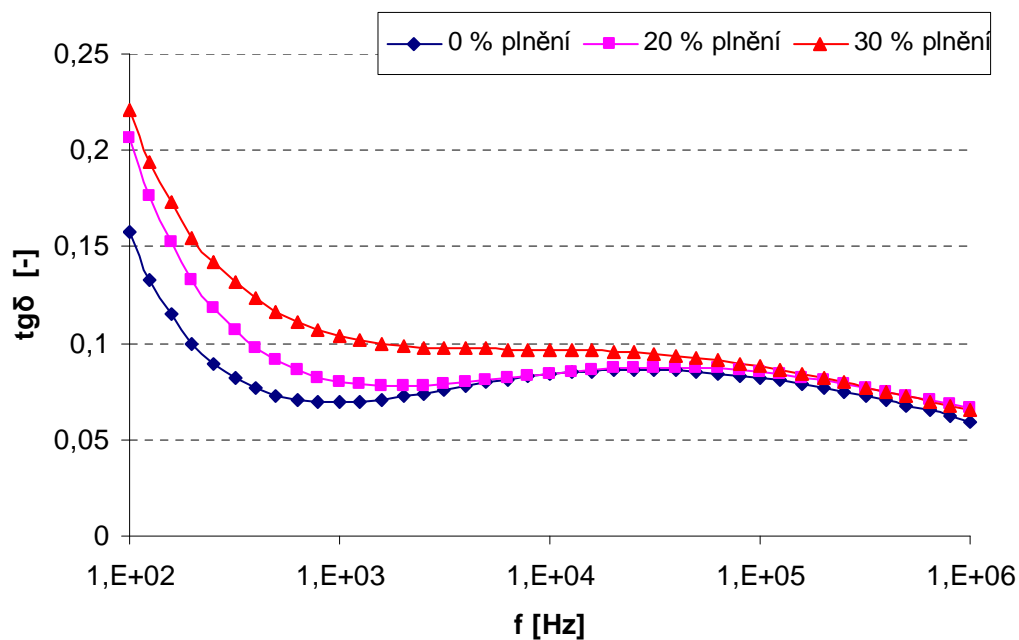
Obr. 3.17 Kmitočtová závislost $tg\delta$ při teplotě 50 °C s relativní vlhkostí 0 % a s plněním jako parametr



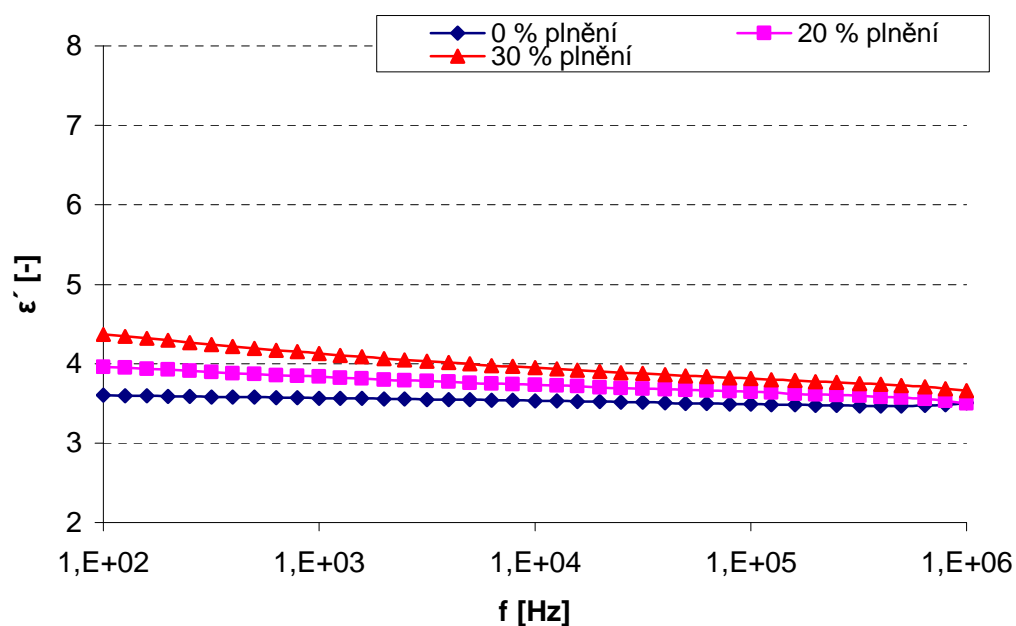
Obr. 3.18 Kmitočtová závislost $\text{tg}\delta$ při teplotě 80 °C s relativní vlhkostí 0 % a s plněním jako parametr



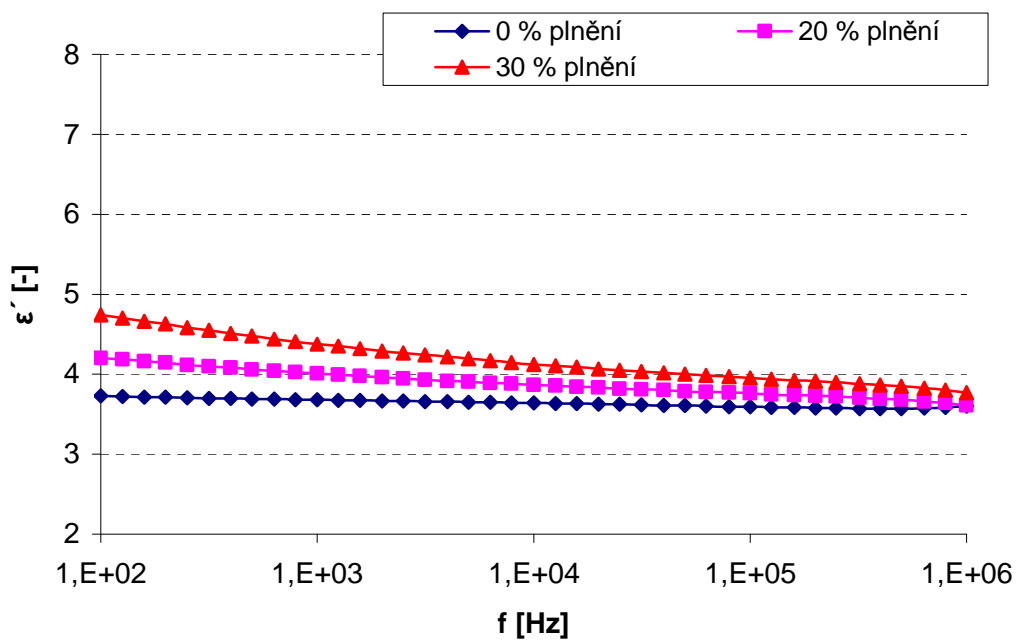
Obr. 3.19 Kmitočtová závislost $\text{tg}\delta$ při teplotě 100 °C s relativní vlhkostí 0 % a s plněním jako parametr



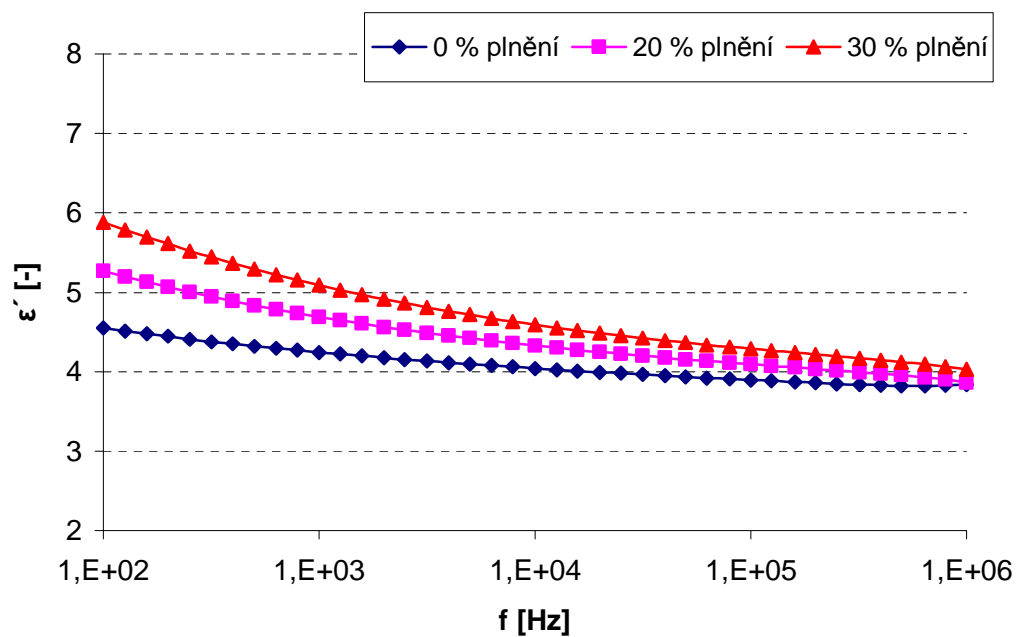
Obr. 3.20 Kmitočtová závislost $tg\delta$ při teplotě 120 °C s relativní vlhkostí 0 % a s plněním jako parametr



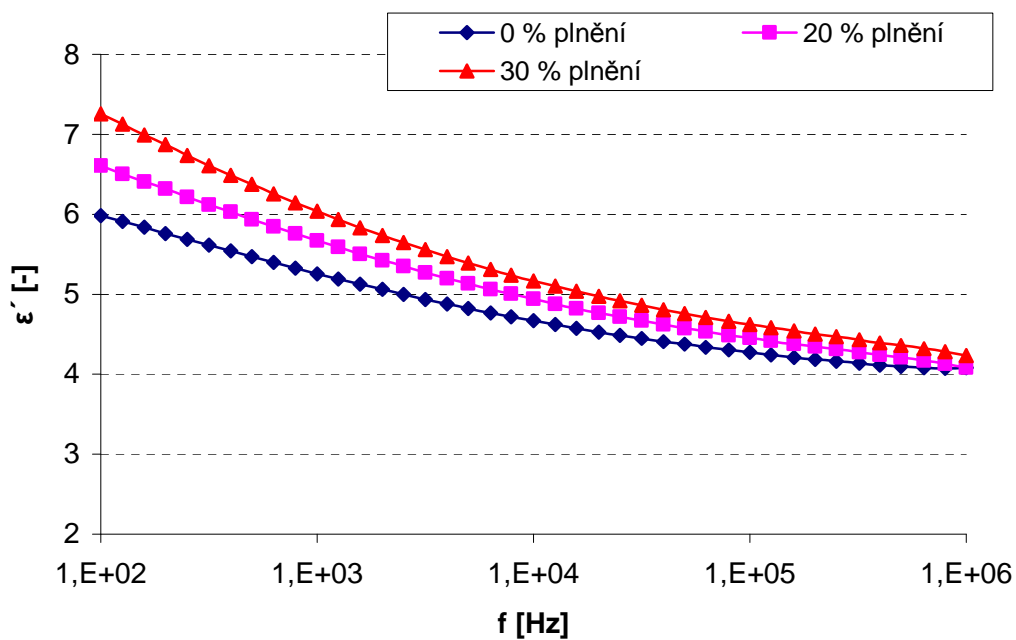
Obr. 3.21 Kmitočtová závislost ϵ' při teplotě 24 °C s relativní vlhkostí 0 % a s plněním jako parametr



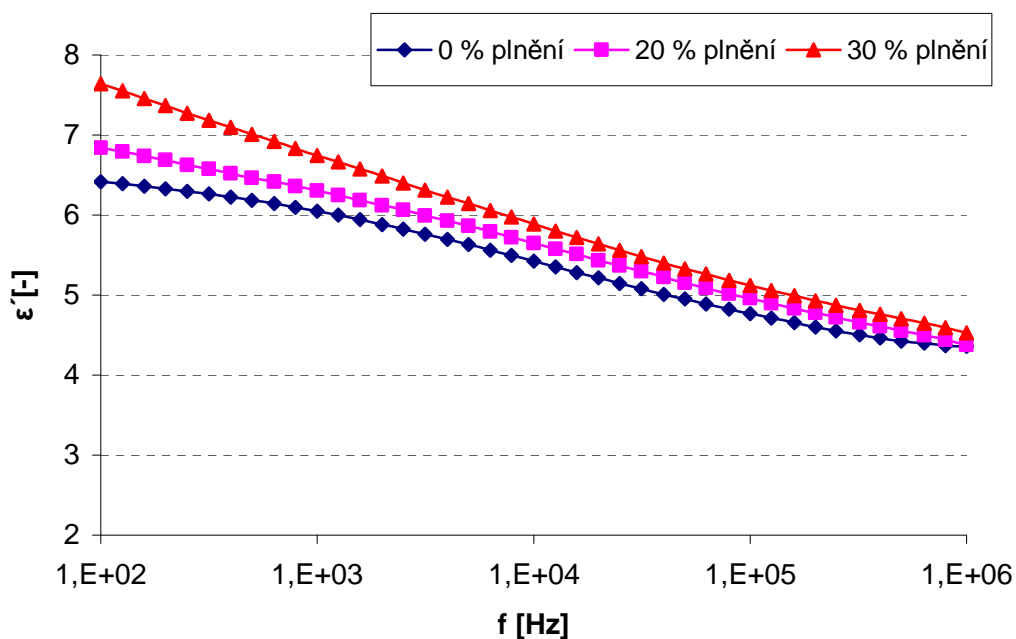
Obr. 3.22 Kmitočtová závislost ε'' při teplotě 50 °C s relativní vlhkostí 0 % a s plněním jako parametr



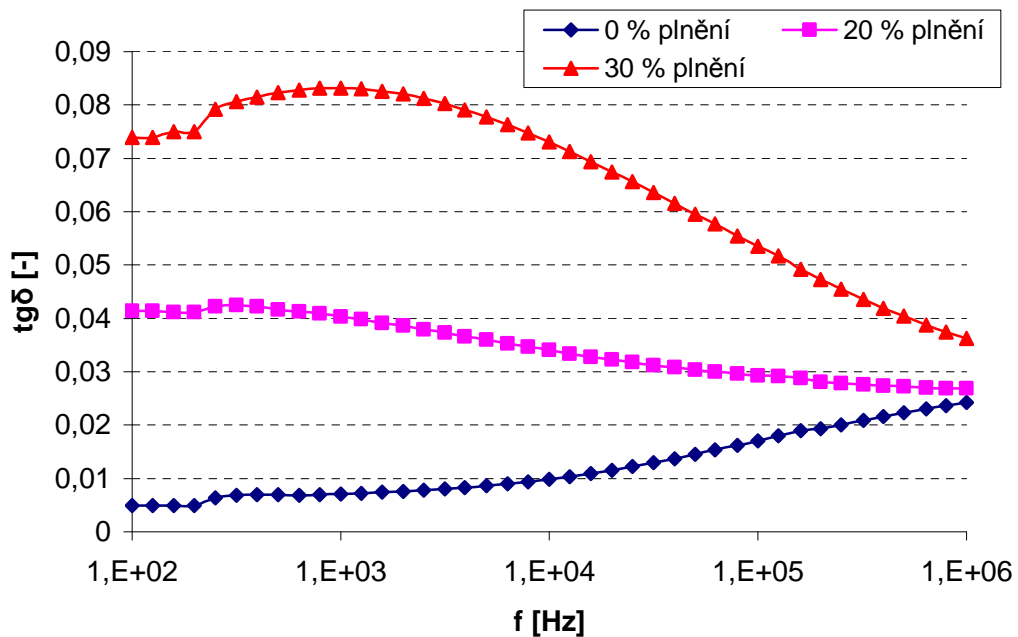
Obr. 3.23 Kmitočtová závislost ε'' při teplotě 80 °C s relativní vlhkostí 0 % a s plněním jako parametr



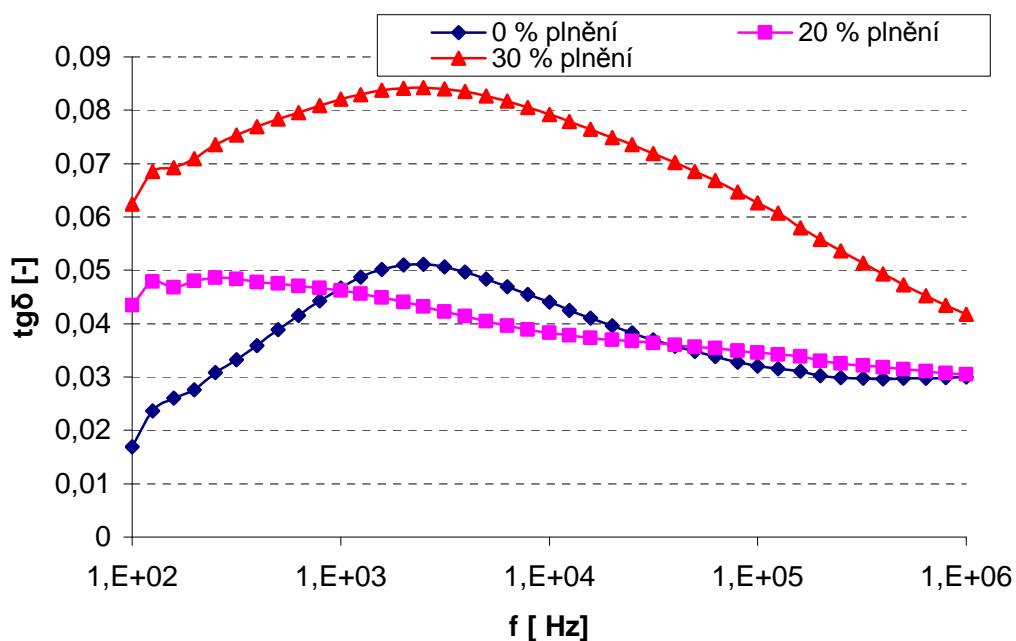
Obr. 3.24 Kmitočtová závislost ϵ' při teplotě 100 °C s relativní vlhkostí 0 % a s plněním jako parametr



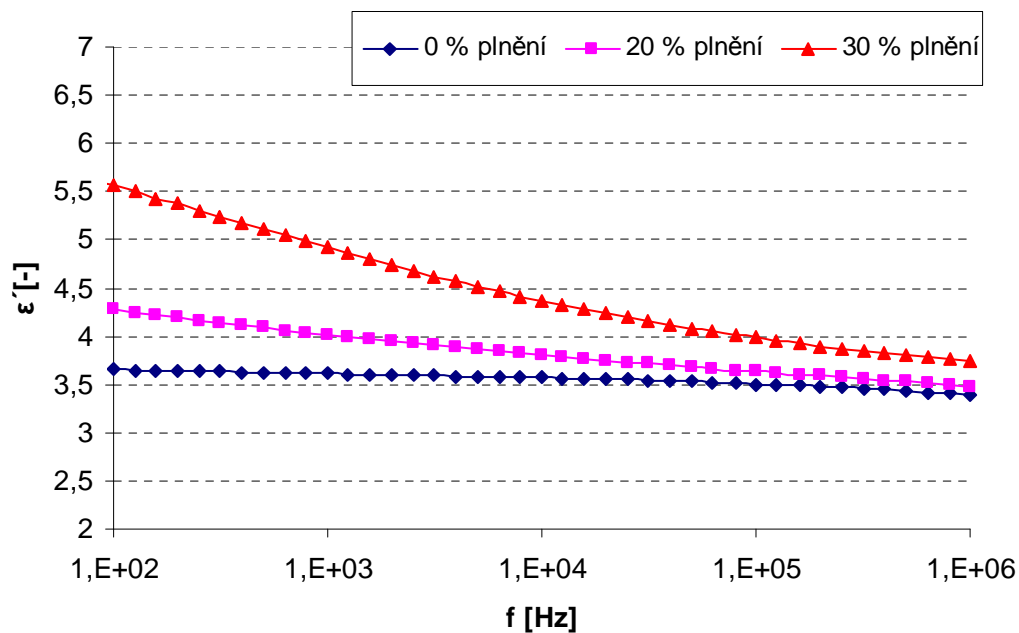
Obr. 3.25 Kmitočtová závislost ϵ' při teplotě 120 °C s relativní vlhkostí 0 % a s plněním jako parametr



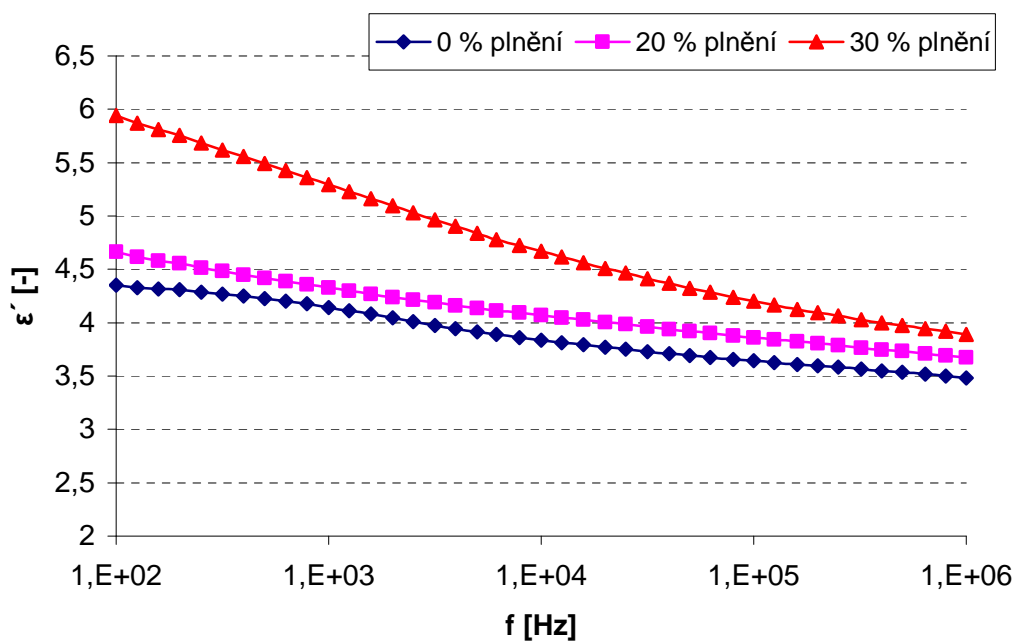
Obr. 3.26 Kmitočtová závislost $tg\delta$ při teplotě 24 °C s relativní vlhkostí 55 % a s plněním jako parametrem



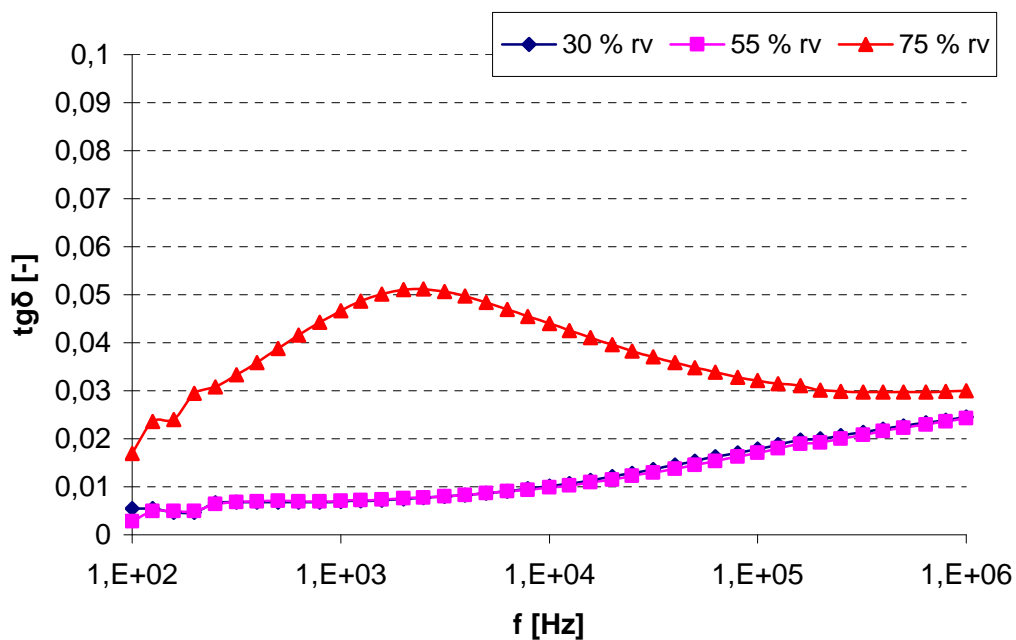
Obr. 3.27 Kmitočtová závislost $tg\delta$ při teplotě 24 °C s relativní vlhkostí 75 % a s plněním jako parametrem



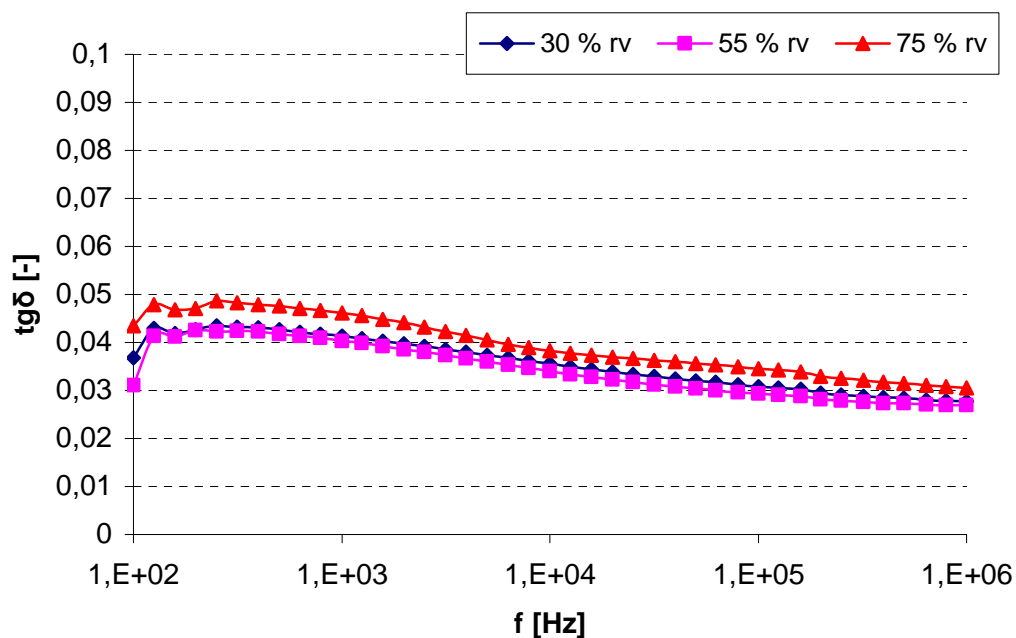
Obr. 3.28 Kmitočtová závislost ε' při teplotě 24 °C s relativní vlhkostí 55 % a s plněním jako parametrem



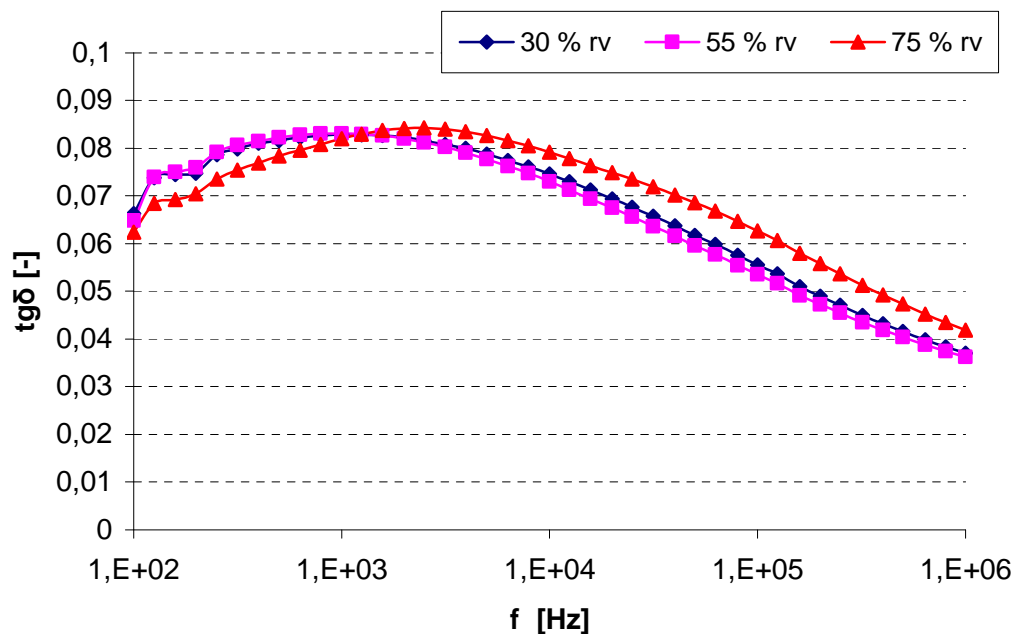
Obr. 3.29 Kmitočtová závislost ε' při teplotě 24 °C s relativní vlhkostí 75 % a s plněním jako parametrem



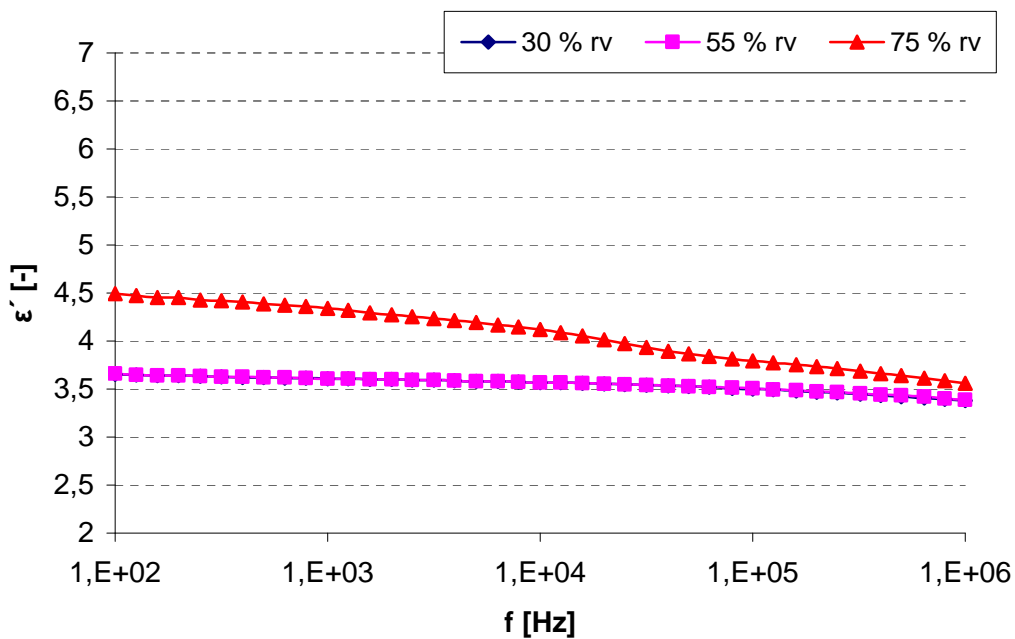
Obr. 3.30 Kmitočtová závislost $tg\delta$ vzorku plněného 0 % slídou při 24 °C a s relativní vlhkostí jako parametrem



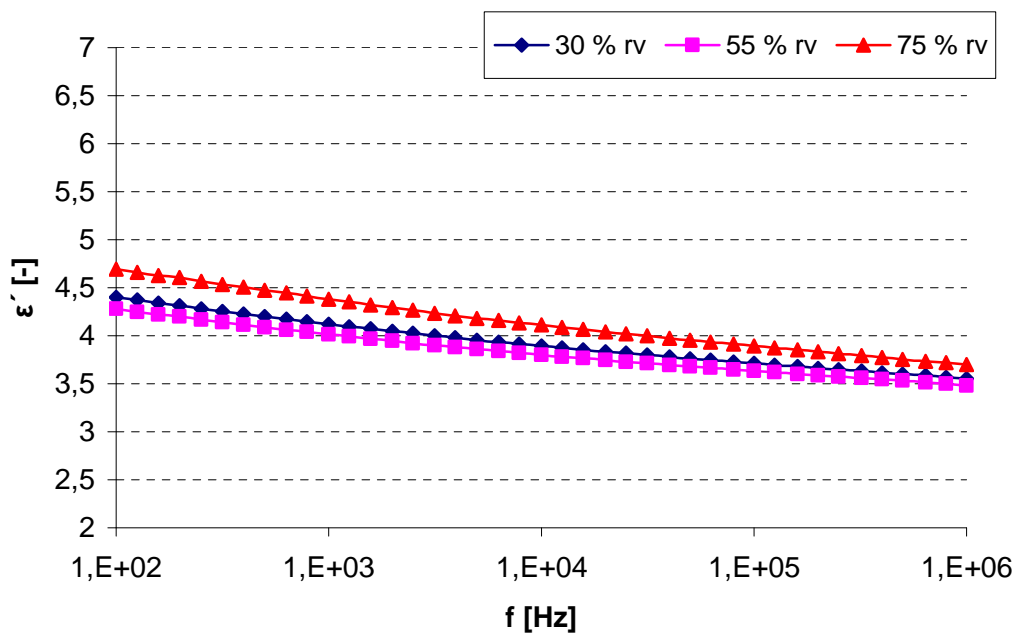
Obr. 3.31 Kmitočtová závislost $tg\delta$ vzorku plněného 20 % slídou při 24 °C a s relativní vlhkostí jako parametrem



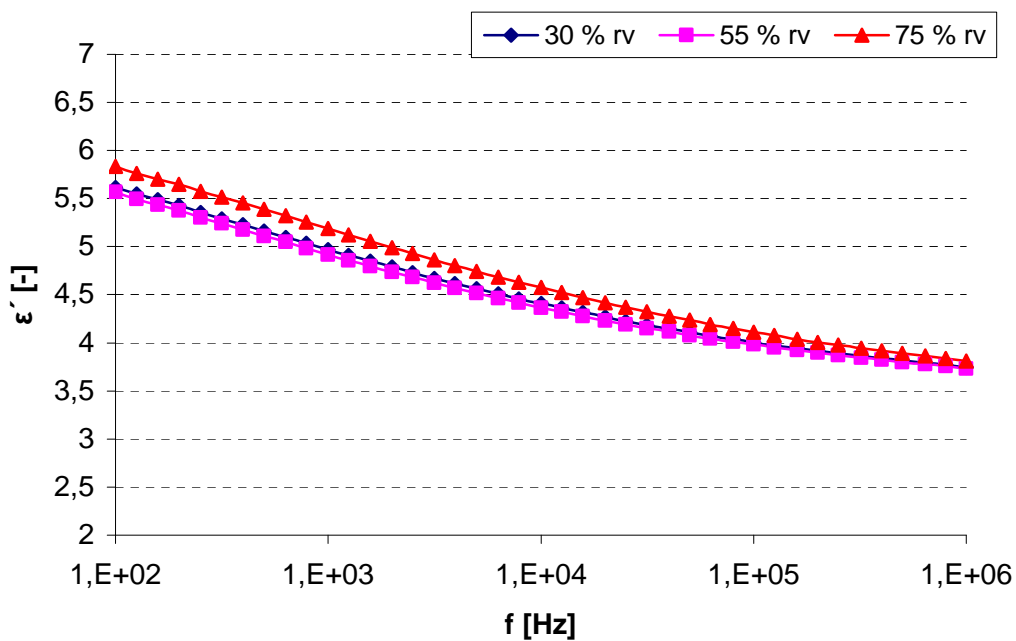
Obr. 3.32 Kmitočtová závislost $tg\delta$ vzorku plněného 30 % slídou při 24 °C a s relativní vlhkostí jako parametrem



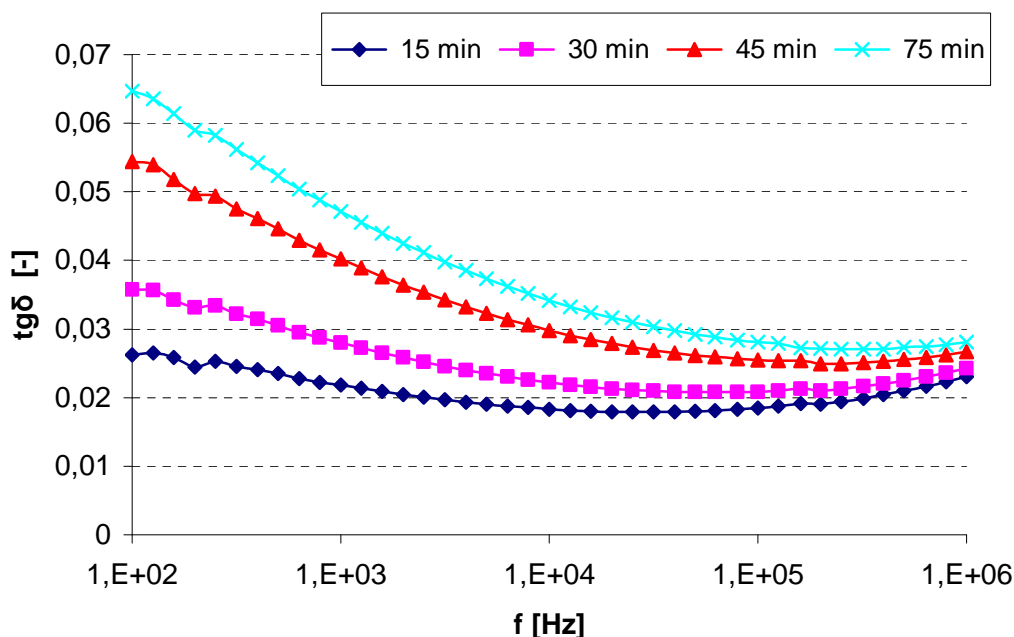
Obr. 3.33 Kmitočtová závislost ϵ' vzorku plněného 0 % slídou při 24 °C a s relativní vlhkostí jako parametrem



Obr. 3.34 Kmitočtová závislost ε' vzorku plněného 20 % slídou při 24 °C a s relativní vlhkostí jako parametrem



Obr. 3.35 Kmitočtová závislost ε' vzorku plněného 30 % slídou při 24 °C a s relativní vlhkostí jako parametrem



Obr. 3.36 Kmitočtové a časové závislost $tg\delta$ neplněného vzorku kondicionovaného při 24 °C a 30 % relativní vlhkosti, po vložení do klimatické komory s nastavenými hodnotami 80 °C s 30 % relativní vlhkostí

Na prvním pracovišti byly měřeny dielektrické vlastnosti vzorků v závislosti na teplotě při 0 % relativní vlhkosti. Naměřené hodnoty jsou vyneseny v grafech na Obr. 3.10 až Obr. 3.25. Celkově z naměřených charakteristik vyplývá, že ztrátový činitel a relativní permitivita s teplotou rostou. Výsledky odpovídají teoretickým předpokladům, že relaxační polarizace jsou teplotně závislé. Se zvyšující se teplotou dochází k posunu relaxačního maxima k vyšším kmitočtům, což je zřejmé z Obr. 3.20. Z těchto závislostí je také patrné, že vzorky s vyšším hmotnostním plněním slídou vykazují horší dielektrické vlastnosti než samotná epoxidová pryskyřice. Je to dáno tím, že základní (neplněná) epoxidová licí hmota je vysoce kvalitní materiál s nízkou hodnotou $tg\delta$. Je pravděpodobné, že pro matici s horšími dielektrickými vlastnostmi by s plněním mletou slídou došlo ke zlepšení těchto vlastností.

Na druhém pracovišti byly sledovány vlivy vlhkosti na dielektrické vlastnosti vzorků. Na Obr. 3.36 jsou znázorněny kmitočtové závislosti dielektrických veličin vzorku kondicionovaného při teplotě 24 °C a 30 % relativní vlhkosti. Takto kondicionovaný vzorek byl spolu s elektrodovým systémem vložen do klimatické komory s nastavenými hodnotami 80 °C a 30 % r.v. vzduchu. Kmitočtové závislosti byly pozorovány 15, 30, 45 a 75 minut od vložení vzorku do klimatické komory. Cílem tohoto dílčího experimentu bylo zjistit, jak rychle se mění dielektrické vlastnosti vzorku při změně podmínek z 24 °C a 30 % relativní vlhkosti na podmínky 80 °C a 30 % relativní vlhkosti. Z Obr. 3.36 je zřejmé, že k navlhčení vzorku dochází postupně a sledované veličiny po 75 minutách zdaleka nebyly ustáleny. Podílí

se na tom hlavně skutečnost, že při stejné relativní vlhkosti, ale při vyšší teplotě se podstatně zvýší absolutní vlhkost prostředí což je patrné z Obr. 2.5, tudíž navlhání je výraznější.

Změny dielektrických vlastností způsobené navlháním při teplotě okolí (24 °C) jsou uvedeny na Obr. 3.26 a Obr. 3.27. Z těchto obrázků je zřejmé, že po týdenním kondicionování při teplotě 24 °C a relativní vlhkosti 55 % a 75 % nedošlo k výraznější změně $tg\delta$ ani ϵ' . Pouze na Obr. 3.27 při 75 % relativní vlhkosti došlo ke změně $tg\delta$ a ϵ' u vzorku s 0 % plněním. U ostatních vzorků při teplotě okolí je navlhavost velmi nízká a týdenní kondicionování nevedlo k pozorovatelné změně sledovaných parametrů vzorků. Bylo by možné říci, že slída snižuje navlhavost kompozitních vzorků, ale to by bylo nutno doložit dalšími experimenty s prodlouženou dobou kondicionování na dobu 4, 6 i více týdnů.

V grafech uvedených v práci je na osách y použito vždy stejné měřítko pro stejnou skupinu závislostí, aby bylo snazší porovnání naměřených průběhů.

4 Závěr

Výsledky měření prokázaly, že epoxidová pryskyřice plněná mletou slídou o různém hmotnostním procentu, má dielektrické vlastnosti sledované v kmitočtové závislosti poněkud horší, než neplněná epoxidová pryskyřice. Je to dáno velmi dobrými dielektrickými vlastnostmi epoxidové matrice. Obecně pro kompozitní materiály platí, že plněním se sleduje zlepšení mechanických a dielektrických vlastností nevyhovující matrice, ke kterému v tomto případě nedošlo.

5 Seznam použité literatury

- [1] Blahník R.: Teorie vlivu vlhkosti na izolanty. Skriptum. Státní pedagogické nakladatelství
- [2] Blahník, R.: Vlhkost vzduchu. Skriptum. Státní pedagogické nakladatelství SPN Praha, 1964
- [3] WW stránky <http://cs.wikipedia.org/wiki/Kapaln%C4%9Bn%C3%AD>>
- [4] Liederman, K., Rozsivalová, Z.: Klimatotechnologie. Skriptum VUT Brno
- [5] Mentlík V. Dielektrické prvky a systémy. BEN, Praha 2006
- [6] Kazelle, J., Liedermann, K., Jiráček, J., Havlíček, S., Vaněk, J., Rozsivalová, Z., Sedlaříková, M.: Elektrotechnické materiály a výrobní procesy. Skriptum VUT Brno
- [7] Agilent technologies impedance measurement – Handbook 2006
- [8] Climacell BMT-Brněnská Medicínská Technika, Návod k použití